

Российская Академия Архитектуры и Строительных Наук
(РААСН)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт бетона и железобетона
(НИИЖБ)

РУКОВОДСТВО

ПО ПРОГРЕВУ БЕТОНА
В МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Под редакцией:

Б.А. Крылова
С.А. Амбарцумяна
А.И. Звезда

Москва, 2005 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	4
Введение	5
Глава 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	7
§ 1.1 Тепловая обработка и ее назначение для интенсификации тверде- ния бетона	7
§ 1.2 Критерии определения эффективности прогрева бетона	7
§ 1.3 Материалы для бетона	8
§ 1.4 Ускорение твердения бетона методами электротермообработки	9
§ 1.5 Режимы прогрева бетона	13
§ 1.6 Расчет основных параметров прогрева бетона	15
§ 1.7 Влияние режимов прогрева на формирование структуры бетона	20
§ 1.8 Методы тепловой обработки бетона в монолитных конструкциях ...	24
Глава 2. ЭЛЕКТРОПРОГРЕВ БЕТОНА	29
§ 2.1 Общие положения	29
§ 2.2 Удельное электрическое сопротивление бетона	33
§ 2.3 Электроды	36
§ 2.4 Параметры электропрогрева бетона	40
§ 2.5 Пример расчета параметров электропрогрева бетона	46
§ 2.6 Электропрогрев бетонов с противоморозными добавками	50
§ 2.7 Производство работ при электропрогреве бетона	53
§ 2.8 Техника безопасности при электропрогреве бетона	56
Глава 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ	58
§ 3.1 Сущность метода и область применения	58
§ 3.2 Технология производства работ	59
§ 3.3 Расчет бункера для порционного электроразогрева бетонной смеси	63
§ 3.4 Особенности применения в построечных условиях	66
§ 3.5 Установки непрерывного действия	68
§ 3.6 Принципы конструирования установок для термовиброобработки бетонной смеси	69
§ 3.7 Расчет параметров установки ТВОБС	71
§ 3.8 Учет недогрева крупного заполнителя	77
§ 3.9 Особенности бетонирования конструкций разогретыми смесями и последующего выдерживания бетона	78
§ 3.10 Бетонирование конструкций с использованием термовиброобра- ботанных смесей	84
§ 3.11 Особенности расчета режима выдерживания бетона из термовиб- рообработанных смесей	85
§ 3.12 Техника безопасности при предварительном электроразогреве бетонной смеси	89

Глава 4. ФОРСИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВ БЕТОНА В КОНСТРУКЦИЯХ	91
§ 4.1 Сущность метода	91
§ 4.2 Укладка бетонной смеси и форсированный ее электроразогрев	94
§ 4.3 Выдерживание бетона в конструкциях и контроль за температурным режимом твердения	95
§ 4.4 Расчет конструктивных параметров и режимов эксплуатации оборудования	96
§ 4.5 Назначение температуры разогрева бетона и необходимой теплоизоляции	99
§ 4.6 Техника безопасности при форсированном электроразогреве бетона в конструкциях	101
Глава 5. ПРОГРЕВ БЕТОНА ГРЕЮЩИМИ ИЗОЛИРОВАННЫМИ ПРОВОДАМИ	103
§ 5.1 Сущность метода и область применения	103
§ 5.2 Технология производства работ	104
§ 5.3 Расчет потребной тепловой мощности	110
§ 5.4 Прогрев бетона с использованием полимерного греющего провода..	114
§ 5.5 Контроль качества при прогреве бетона греющими изолированными проводами	119
§ 5.6 Техника безопасности при прогреве бетона греющими проводами..	120
§ 5.7 Пример расчета и схема установки греющих проводов в монолитных конструкциях	121
Глава 6. ОБОГРЕВ БЕТОНА В ГРЕЮЩЕЙ ОПАЛУБКЕ	123
§ 6.1 Сущность метода и область применения	123
§ 6.2 Конструкции греющих опалубок	123
§ 6.3 Расчет энергетических параметров нагрева	127
§ 6.4 Определение коэффициента теплопередачи	134
§ 6.5 Выбор шага линейных электронагревателей	136
§ 6.6 Конструкции греющей опалубки с электронагревателями	139
§ 6.7 Греющие опалубки с нагревателями из углеродистых и графитовых тканей	143
§ 6.8 Опалубка с токопроводящим греющим покрытием	154
§ 6.9 Конструкции инвентарных греющих гибких покрытий	158
§ 6.10 Гибкие греющие устройства из греющего провода с полимерной жилой	162
§ 6.11 Монтаж и электроподключение нагревательных элементов в греющих опалубках и в гибких греющих устройствах	163
§ 6.12 Технология обогрева бетона в греющей опалубке и при применении греющих матов	169
§ 6.13 Обогрев бетона при возведении специальных монолитных конструкций в скользящей опалубке	172
§ 6.14 Производство работ по прогреву бетона в греющей опалубке	176

Глава 7. ВОЗДУШНЫЙ КОНВЕКТИВНЫЙ ПРОГРЕВ МОНОЛИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	180
§ 7.1 Сущность метода и разновидности конвективного прогрева	180
§ 7.2 Генераторы для конвективного прогрева конструкций	182
§ 7.3 Производство работ и определение параметров прогрева	184
§ 7.4 Пример расчета технологических параметров конвективного прогрева	187
§ 7.5 Техника безопасности при конвективном прогреве	190
Глава 8. ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ (ИНДУКЦИОННЫЙ ПРОГРЕВ)	191
§ 8.1 Сущность метода и область применения	191
§ 8.2 Технология производства работ при прогреве бетона в электромагнитном поле	191
§ 8.3 Порядок выполнения работ по индукционному нагреву монолитных конструкций	199
§ 8.4 Контроль температурного режима и набора прочности бетона	201
§ 8.5 Техника безопасности	202
§ 8.6 Примеры расчета тепловой обработки бетона индукционным методом	202
Глава 9. ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗА ПРОИЗВОДСТВОМ БЕТОННЫХ РАБОТ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ	207
Глава 10 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА БЕТОННЫХ РАБОТ И ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	212
ПРИЛОЖЕНИЯ	216
1. Ориентировочные величины потребной и выделяемой электрической мощности при электропрогреве бетона	217
2. Методика определения удельного электрического сопротивления бетона в строительной лаборатории.....	223
3. Расчет темпа и продолжительности остывания поверхностного слоя конструкции	227
4. Определение температуры и продолжительности остывания конструкций	230
5. Пример расчета режимов термовиброобработки бетонной смеси и выдерживания бетона	249
6. Предварительный электроразогрев бетонной смеси в автобетоносмесителях	257
7. Предварительный пароразогрев бетонных смесей в автобетоносмесителях	262
БИБЛИОГРАФИЯ	270

Предисловие

В современном отечественном строительстве интенсификация твердения бетона базируется в основном на применении теплого воздействия, преимущественным источником которого является электрическая энергия. Использование этого теплоносителя позволяет легко и удобно управлять процессом прогрева и со временем автоматизировать его, решать экологические проблемы – при электротермообработке бетона нет шума и никаких вредных для здоровья человека и окружающей среды выделений.

На протяжении нескольких десятилетий, начиная с 40-х годов 20-го столетия, электротермообработка прекрасно себя зарекомендовала и получила всеобщее признание производственных организаций. Эта группа методов интенсификации твердения бетона, наряду с другими методами продолжает развиваться и совершенствоваться.

В настоящем "Руководстве" излагаются рекомендуемые для применения в строительстве различные методы термообработки бетона с указанием рациональной области применения каждого, технические характеристики, особенности расчета и другие необходимые данные.

В основу "Руководства" положены результаты исследований многих специалистов научно-исследовательских организаций нашей страны во главе с НИИЖБом, материалы ранее разработанных инструктивных документов, а также накопленный опыт отечественного и зарубежного строительства. "Руководство" предназначено для инженерного персонала строительных, производственных, проектных и научно-исследовательских организаций, а также построечных лабораторий.

Финансовую поддержку разработки «Руководства» осуществляли НИИЖБ, РААСН и большой вклад в это внес УМИС Главмосстроя.

Настоящее "Руководство" разработано специалистами различных научно-исследовательских, учебных и производственных организаций Москвы, Санкт-Петербурга, Владимира, Челябинска и Минска под руководством академика РААСН, д.т.н., профессора Б.А. Крылова. В работе принимали участие:

д.т.н. С.А.Амбарцумян; д.т.н., проф. А.С.Арбеньев; чл.-кор. РААСН, д.т.н., проф. А.А.Афанасьев; к.т.н. Л.Н.Беккер; к.т.н. Б.Г.Веснин; к.т.н., с.н.с. В.Я.Гендин; чл.-кор. РААСН, д.т.н., проф. С.Г.Головнев; инж., с.н.с. С.Г.Зимин; д.т.н., проф. А.И.Звездов; д.т.н., проф. Л.М.Колчеданцев; к.т.н., проф. В.Д.Копылов; д.т.н., проф. Б.М.Красновский; д.т.н., гл.н.с. С.Б.Крылов; д.т.н., проф. В.П.Лысов; к.т.н. А.С.Мартиросян; к.т.н., гл.н.с. А.И.Сагайдак; д.т.н., проф. А.Р.Соловьянчик; к.т.н., с.н.с. С.М.Трембицкий; к.т.н., с.н.с. С.А.Шифрин.

Общая редакция "Руководства" осуществлена Б.А.Крыловым, С.А. Амбарцумяном и А.И. Звездовым.

Введение

Современное строительство значительный крен делает на возведении зданий и сооружений из монолитного железобетона. Этому несколько причин.

Во-первых, сооружения из монолитного железобетона более устойчивы при сейсмических и других динамических воздействиях.

Во-вторых, поскольку бетон обладает прекрасными пластическими свойствами, то из него можно формировать конструкции любой формы, что придаёт зданию или сооружению индивидуальный облик. Это открывает огромные возможности для архитекторов.

В-третьих, монолитный железобетон имеет ряд преимуществ по сравнению со сборными железобетонными конструкциями, что в условиях рынка весьма важно. Так при монолитном строительстве на 40-45% уменьшаются затраты на создание производственной базы, на 7-20% снижается расход металла, до 40% уменьшается расход бетона.

Разумеется, это не значит, что надо полностью переходить на монолитное строительство – это было бы большим заблуждением.

Сборный и монолитный железобетон должны применяться только в той сфере строительства, где они наиболее выгодны. В зарубежной практике сборный железобетон широко используется и его доля составляет в среднем от 20 до 40% от общего объема строительства. Не должны и мы закрывать дорогу сборному железобетону и не переставать заниматься его совершенствованием и развитием в нашем отечестве.

Развитие монолитного строительства выявило ряд трудностей, которые вызваны спецификой климатических условий и отсутствием большого опыта по применению современных технологий. Естественно, это приводит и к низкому качеству возводимых объектов и даже к авариям, а также к повышенным затратам средств и труда. Достаточно напомнить, что на сегодня в нашем монолитном строительстве трудозатраты в 1,5-2,5 раза выше по сравнению с аналогичными работами в передовых строительных фирмах наиболее технически развитых стран.

В общем комплексе бетонных работ около 60% приходится на ручной труд практически на всех технологических переделах. Естественно, с внедрением новых технологий, повышением механизации, приобретением должного опыта, разного рода приспособлений и инструментов ситуация будет меняться в лучшую сторону и это наглядно можно видеть на деятельности передовых производственных организаций Москвы, Санкт-Петербурга и др.

Однако, в монолитном строительстве есть один технологический передел – твердение бетона, который в значительной степени влияет на сроки производства не только бетонных работ, но и вообще на сроки возведения зданий и инженерных сооружений.

Поскольку в современном строительстве сроки возведения объектов имеют первостепенное значение, то без интенсификации твердения бетона обойтись невозможно. Для нашей страны это особенно важно, поскольку холодное время года в разных районах составляет от 3 до 10 месяцев; при низких же положительных температурах бетон твердеет крайне медленно, а при преждевре-

менном его замораживании качество и долговечность возводимых конструкций резко падают.

Именно поэтому в отечественной и зарубежной практике прибегают к применению различных методов ускорения твердения бетона до достижения им требуемых структурных характеристик. Наиболее действенным из них является термообработка бетона. Существенно, что ускорить твердение бетона становится весьма важным не только при возведении объектов в холодное время года, но и в летний период.

В современной технологии монолитного строительства применяются разные методы термообработки бетона, но только хорошее знание возможностей каждого метода позволяет грамотно и экономично выбирать наилучший для конкретных температурных условий среды, видов возводимых конструкций, возможностей производственной организации и др. факторов. Необходимо помнить, что универсальных методов нет и каждый метод может дать наилучший эффект только при разумном его применении.

В настоящем "Руководстве" излагаются рекомендуемые для использования в строительстве различные методы термообработки бетона с указанием рациональной области применения каждого, технические характеристики, особенности расчета и другие необходимые данные.

В основу "Руководства" положены результаты исследований научно-исследовательских организаций нашей страны во главе с НИИЖБом, а также накопленный опыт отечественного и зарубежного строительства. "Руководство" предназначено для инженерного персонала строительных организаций, построечных лабораторий, проектных и научно-исследовательских организаций.

Глава 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

§ 1-1. Тепловая обработка и ее назначение для интенсификации твердения бетона.

Тепловая обработка является наиболее эффективным способом ускорения твердения бетона. Именно это качество явилось причиной ее широкого применения на заводах при производстве сборных бетонных и железобетонных изделий и на строительных площадках при возведении зданий и сооружений из монолитного железобетона.

Сущность воздействия температурного фактора на твердение бетона заключается в изменении химической активности воды. С повышением температуры она возрастает вследствие распада крупных ассоциатов из молекул воды на более мелкие. К тому же они становятся подвижнее и их взаимодействие с частицами цемента становятся интенсивнее, процесс гидратации вяжущего ускоряется. Это приводит к появлению новообразований, формирующих цементный камень и связывающих все компоненты в единый монолитный конгломерат – бетон.

При тепловой обработке твердение бетона настолько интенсифицируется, что представляется возможным обеспечить достижение проектной прочности примерно в 20-30 раз быстрее, чем при температуре 20⁰С. При температурах 80-90⁰С даже вводимые в цемент или в бетонную смесь добавки шлака проявляют химическую активность и в определенной степени приобретают свойства вяжущих.

Тепловая обработка бетона имеет довольно много разновидностей, отличающихся видом теплоносителя, подводом тепла, применяемыми генераторами выделения тепла.

§ 1-2. Критерии определения эффективности прогрева бетона.

Основными критериями эффективности прогрева бетона являются: качество конструкции, расход энергии, сроки возведения объекта. Качество конструкции включает в себя широкое понятие – от внешнего вида до прочностных показателей бетона и долговечности. В построечных условиях контролируются прочностные характеристики и может проверяться морозостойкость стандартными методами.

Важным показателем является расход энергии на термообработку бетона. С целью снижения ее до технически обоснованного уровня выбираются наиболее целесообразные методы прогрева бетона и сроки распалубки конструкций, а также укрытия их неопалубленной поверхности паро- и теплоизоляцией. Автоматическое управление процессом прогрева в ближайшем будущем явится наиболее эффективным способом сокращения расходования электроэнергии на прогрев бетона.

Важное значение приобретают в современном строительстве сроки возведения объекта. Поскольку твердение бетона до достижения требуемой прочности занимает наибольшее время при производстве бетонных работ, то вполне естественно стремление к технически разумному его сокращению. Именно поэтому распалубка конструкций в зависимости от их вида и сроков загрузки,

осуществляется при прочности бетона от 50 до 80% от проектной (в соответствии с требованием СНиП). Бетон в конструкциях, распалубленный при прочности ниже проектной, в дальнейшем будет продолжать твердеть при положительной температуре и достаточной влажности и к моменту загрузки проектную прочность обычно приобретает. В этом случае характер нарастания прочности бетона после распалубки постоянно должен контролироваться. Если возникают опасения, что ко времени сдачи конструкции в эксплуатацию бетон проектную прочность не наберет, необходимо принять дополнительный прогрев конструкции с обязательным ее увлажнением.

К бетонам специальных конструкций, которые, например, во время эксплуатации подвергаются постоянному замораживанию в водонасыщенном состоянии и оттаиванию, истиранию или одностороннему напору жидкости помимо прочностных показателей предъявляются и другие требования, определяемые для них нормативными документами (морозостойкость, коэффициент фильтрации, водопроницаемость и др.).

§ 1-3. Материалы для бетона.

В качестве вяжущего для бетонов, подвергаемых электротермообработке, могут использоваться: портландцемент, шлакопортландцемент, быстротвердеющий портландцемент. Применение глиноземистых цементов не желательно. Рекомендуется применять цемент с содержанием трехкальциевого силиката (C_3S) не менее 50...60%, трехкальциевого алюмината (C_3A) не более 9%, активных кремнеземных добавок в портландцементе (трепела, шлака и др.) не более 10%. Применение пуццоланового портландцемента допускается в случае, когда это необходимо по условиям службы конструкции (например, в агрессивных водах). Пластифицированные и гидрофобные цементы, а также добавки пластификаторов для бетонов, подвергаемых прогреву при температурах выше $50^{\circ}C$, могут использоваться только после предварительной проверки прочности и морозостойкости бетонов после принятых режимов прогрева.

Для бетонов, подвергаемых предварительному электроразогреву или форсированному электроразогреву в опалубке с повторным уплотнением, рекомендуется применять цементы с содержанием C_3A не более 6%. При этом, независимо от содержания C_3A в цементе следует обязательно производить предварительную лабораторную проверку потерь подвижности бетонных смесей при достижении заданной температуры разогрева.

Для улучшения электропроводности бетонных смесей и получения повышенной прочности, приобретаемой бетоном сразу после прогрева, допускается применение химических добавок-электролитов: хлористого кальция, хлористого натрия, нитрата натрия в количествах, не превышающих 0,5% от массы цемента.

В бетоны, подвергаемые электротермообработке, допускается введение других видов добавок (воздухо-вовлекающих, пластифицирующих) в количествах, разрешаемых действующими документами, если они обеспечивают требуемую прочность прогретого бетона.

§ 1-4. Ускорение твердения бетона методами электротермообработки.

Электротермообработка является основным методом интенсификации твердения бетона при возведении монолитных конструкций зданий и сооружений в зимнее время. Не менее эффективной она оказалась и в летнее время, поскольку обеспечивает быстрое твердение бетона при незначительных затратах электроэнергии. В районах с сухим и жарким климатом применение электротермообработки позволяет благодаря интенсификации твердения связать значительную часть воды затворения химически и физически и тем самым избежать трещинообразования в конструкциях при высыхании бетона в раннем возрасте. Электротермообработка бетона объединяет группу методов, основанных на использовании тепла, получаемого от превращения электрической энергии в тепловую. Это может происходить или непосредственно в материале, когда электрический ток пропускается через бетон, или в различного рода электронагревательных устройствах, от которых тепло подводится к бетону радиационно, кондуктивно или конвективно.

Разнообразие методов электротермообработки позволяет в каждом конкретном случае (в зависимости от вида конструкции, ее размеров, конфигурации, характера армирования и т.д.) выбирать наиболее эффективный из них.

Выбор наиболее рационального метода электротермообработки бетона диктуется не только особенностями прогреваемой конструкции, но и возможностями самого метода, которые следует хорошо знать. Для этого, крайне необходима классификация методов электротермообработки, которая поможет грамотно выбрать такой из них, который будет для конкретных условий наиболее выгоден и с технической и с экономической точек зрения.

Существующие методы электротермообработки бетона можно разделить на три большие группы, если в основу положить принцип превращения электрической энергии в тепловую: непосредственно в бетоне или бетонной смеси (электродный прогрев), электрообогрев, индукционный прогрев.

Электродный прогрев бетона осуществляется непосредственно в конструкции и относится к наиболее эффективным и экономичным видам электротермообработки.

При этом методе представляется возможным поднимать температуру материала до требуемого уровня за любой промежуток времени – от нескольких минут до нескольких часов.

Электрообогрев с помощью электронагревательных устройств осуществляется путем подачи тепла к поверхности бетона радиационно или конвективно от источников превращения электрической энергии в тепловую – нагревателей инфракрасного излучения или низкотемпературных нагревателей (сетчатых, коаксиальных, ТЭНов и др.). Во внутренние слои конструкции тепло передается путем теплопроводности. При установке нагревателей непосредственно в бетон, передача тепла осуществляется кондуктивно.

Прогрев бетона в электромагнитном поле производится путем передачи тепла кондуктивно от разогревающихся вихревыми токами стальных элементов опалубки, арматуры и закладных частей. Непосредственного воздействия на бетон электромагнитное поле с применяющимися на практике параметрами не оказывает и во внутренние слои материала тепло передается путем тепло-

<p>2. Форсированный электроразогрев:</p> <p><i>а) предварительный электроразогрев бетонной смеси</i></p>	<p>Бетонная смесь быстро разогревается вне опалубки, быстро укладывается, уплотняется в горячем состоянии и укрывается. Применяется при возведении массивных монолитных бетонных и железобетонных конструкций.</p>	<p>40 – 80</p>	<p>Для конструкций с $M_{п} \leq 6$ требуемая прочность достигается путем термосного выдерживания. Для конструкций с $M_{п} > 6$ необходим дополнительный прогрев или обогрев бетона.</p>
<p><i>б) форсированный электроразогрев бетона в конструкции с повторным уплотнением</i></p>	<p>Бетонная смесь в холодном состоянии укладывается и уплотняется в опалубке, а затем быстро разогревается и повторно уплотняется. Применяется при возведении монолитных бетонных и мало армированных железобетонных конструкций, дорожных покрытий.</p>	<p>40 – 60</p>	<p>То же.</p>
<p>3. Электрообогрев:</p> <p><i>а) с помощью низкотемпературных электронагревателей</i></p>	<p>Обогрев монолитных конструкций с помощью вмонтированных жестких в виде пластин электронагревателей в опалубку или гибких – в греющие маты и одеяла. Применяются практически для всех видов конструкций.</p>	<p>100 – 130</p>	<p>Обогрев осуществляется по мягким режимам. Опалубка или маты с вмонтированными электронагревателями должны иметь теплоизоляцию с наружной стороны для предупреждения больших теплотерь в окружающую среду. В качестве нагревателей используются:</p> <p>А) трубчатые ТЭНы, трубчато-стержневые, уголково-стержневые, коаксиальные и др.;</p> <p>Б) плоские – сетчатые, пластинчатые и др.;</p> <p>В) струнные – стальная или нихромовая проволока и др.</p>
<p><i>б) с помощью греющего провода</i></p>	<p>Прогрев бетона с помощью греющего провода, закладываемого в бетон. Применяется для прогрева бетона в любых конструкциях.</p>	<p>80-110</p>	<p>Обогрев греющим проводом, устанавливаемым в бетон прогреваемой конструкции. Эти нагреватели имеют температуру на контакте с бетоном - не выше 80°C, а в воздушной среде она может подняться до 300°C.</p>

<p>в) с помощью высокотемпературных нагревателей инфракрасного излучения</p>	<p>Обогрев бетона осуществляется по периферийным зонам конструкции путем подачи тепла непосредственно на бетон или опалубку. Применяется при возведении монолитных конструкций различной конфигурации и армированных по любой схеме, а также при сушке теплоизоляционного бетона и штукатурки.</p>	<p>120 – 200</p>	<p>Обогрев осуществлять с обязательной защитой неопалубленных поверхностей от потерь влаги. Температура на обогреваемой поверхности не должна превышать 80-90⁰С. В качестве нагревателей используются лампы, трубчатые, спиральные, проволочные и другие нагреватели – с температурой на поверхности нагревателя выше 300⁰С.</p>
<p>4. Нагрев бетона в электромагнитном поле (индукционный)</p>	<p>Нагрев железобетонных конструкций линейного типа с равномерно распределенной по сечению арматурой путем устройства индуктора вокруг элемента. Применяется при прогреве густоармированных монолитных конструкций, с равномерно распределенной по сечению арматурой, таких как: колонны, ригели, балки, прогоны, элементы рамных конструкций, стволы труб и силосов, коллекторы и опускные колодцы, сваи и перемычки, а также при замоноличивании стыков каркасных конструкций.</p>	<p>110 – 150</p>	<p>Режимы прогрева мягкие. Скорость подъема температуры – не выше 20⁰С/ч. Нагрев бетона происходит от нагреваемой в электромагнитном поле арматуры или обогрева бетона от металлической опалубки. Нагревание бетона через арматуру или обогрев его опалубкой производить по мягким режимам. Температура на контакте арматуры или опалубки с бетоном не должна превышать 80⁰С.</p>
<p>5. Конвективный прогрев с применением электрокалориферов.</p>	<p>Применяется для обогрева бетона в перекрытиях, стенах, перегородках (замкнутые пространства).</p>	<p>120-200</p>	<p>Режимы прогрева мягкие. Прогрев бетона осуществляется нагретым воздухом, перемещаемым вентиляторами. Нагретый воздух может подаваться по шлангам в местные брезентовые тепляки вокруг прогреваемых конструкций.</p>

Интенсификация твердения бетона при применении методов электрообработки является следствием повышения химической активности воды и

вследствие этого ускоренного протекания физико-химических процессов при повышении температуры (как и при других методах термообработки бетона).

В этом случае образующиеся при твердении бетона фазовый состав новообразований и структура при обеспечении соответствующих температурно-влажностных условий идентичны таковым у бетонов, твердеющих в нормальных условиях.

Электротермообработка при оптимальных режимах прогрева, обеспечивает получение бетонов с заданными физико-механическими свойствами (прочностью на сжатие и растяжение при изгибе, морозостойкостью, сцеплением с арматурой и др.), существенно не отличающимися от свойств бетонов, твердевших в нормальных условиях.

§ 1-5. Режимы прогрева бетона.

Электротермообработку бетона осуществляют по определенным режимам. Под режимом понимают совокупность параметров прогрева, включающем скорость и температуру разогрева, продолжительность изотермического выдерживания, скорость остывания.

Режим теплового воздействия должен обеспечить достижение бетоном заданной прочности и других показателей, указанных в технологической карте.

Температурный режим может включать следующие этапы:

- предварительное выдерживание от момента укладки бетонной смеси в конструкцию до начала прогрева;
- подъем температуры ($\tau_{\text{под.}}$, $t_{\text{под.}}$);
- изотермический прогрев ($\tau_{\text{из.}}$, $t_{\text{из.}}$);
- остывание ($\tau_{\text{ост.}}$, $t_{\text{ост.}}$);

Предварительное выдерживание оказывает положительное влияние на качество бетона до начала прогрева в течение 4-8 часов при нормальной температуре, а еще лучше при низкой положительной ($\sim +5-10^{\circ}\text{C}$). Однако при возведении монолитных конструкций в зимнее время это условие далеко не всегда выполнимо, вследствие быстрого охлаждения бетона в конструкции.

Скорость подъема температуры бетона в наиболее быстро нагреваемых зонах не должна превышать 5°C в час для конструкций с $M_{\text{п}}$ до 4м^{-1} ; $10^{\circ}\text{C}/\text{час}$ для конструкций с $M_{\text{п}}$ от 5 до 10м^{-1} , $15^{\circ}\text{C}/\text{час}$ для конструкций с $M_{\text{п}}$ более 10м^{-1} .

Температура изотермического прогрева бетона в наиболее нагретых зонах не должна превышать 80°C при использовании портландцементов и 90°C при использовании шлакопортландцементов.

Скорость остывания бетона по окончании тепловой обработки не должна превышать для конструкций с модулем поверхности: от 5 до 10м^{-1} – 5°C в час, свыше 10м^{-1} – не более 10°C в час.

Продолжительность нагрева, изотермического прогрева, остывания следует определять в зависимости от температуры и времени твердения в наименее нагретых зонах конструкций.

Начальная температура бетона, уложенного в конструкцию:

а) для метода термоса, электропрогрева, греющих проводов, конвективного обогрева

$$t_{\text{б.н}} = t_{\text{б.см}} - (t_{\text{б.см}} - t_{\text{в.н}})0,01\tau_{\text{тр}}; \quad (1)$$

б) для предварительного разогрева

$$t_{б.н} = t_{раз} - (t_{раз} - t_{н.в})0,05\tau'_{тр}. \quad (2)$$

Требуемая температура бетонной смеси, отпускаемой с бетоносмесительного узла:

а) для методов термоса, электропрогрева, греющих проводов, конвективного прогрева

$$t_{б.см.} = \frac{t_{б.н.} - 0,01t_{н.в.}\tau_{тр}}{1 - 0,01t_{н.в.}\tau_{тр}}; \quad (3)$$

б) для предварительного электроразогрева бетонной смеси

$$t_{б.см.} = \frac{t_{б.н.р} - 0,015t_{н.в.}\tau'_{тр}}{1 - 0,015t_{н.в.}\tau'_{тр}}, \quad (4)$$

где $t_{б.н}$ - начальная температура бетонной смеси, уложенной в конструкцию, °С;

$t_{б.см}$ - температура бетонной смеси, отпускаемой с бетоносмесительного узла, °С;

$t_{раз}$ - температура предварительно разогретой бетонной смеси, °С;

$t_{б.н.р}$ - температура смеси перед разогревом, °С;

$t_{н.в.}$ - температура наружного воздуха, °С;

$\tau_{тр}$ - время транспортирования бетонной смеси от завода до строительной площадки, мин.;

$\tau'_{тр}$ - время транспортирования бетонной смеси от пункта разогрева до места укладки в конструкцию, мин.

В зависимости от характера изменения указанных параметров используются следующие типовые режимы прогрева (рис. 1.1):

- из двух периодов: разогрева и изотермического прогрева. Заданная прочность достигается к моменту окончания изотермического выдерживания. Прирост прочности за время остывания не учитывается. Этот режим рекомендуется применять для прогрева конструкций с $M_{п} > 15м^{-1}$ (рис.1.1а);
- из трех периодов: разогрева, изотермического прогрева и регулируемого остывания. Заданная прочность достигается бетоном к моменту остывания до установленной температуры. Режим рекомендуется для электропрогрева конструкций с $M_{п} < 10-15м^{-1}$ (рис. 1.1б);
- из двух периодов: разогрева и регулируемого остывания. Заданная прочность достигается к моменту остывания бетона до установленной температуры. Режим рекомендуется для электропрогрева конструкций с $M_{п} = 6...10м^{-1}$ (рис. 1.1в);
- ступенчатый режим: разогрев осуществляется в 2-3 приема с малой скоростью при подъеме температуры до 20-30°С с выдерживанием на этом уровне в течении 1...2 часа, с последующим разогревом еще на 20-30°С и выдерживанием при этой температуре 30-60 мин. и далее нагрев примерно столько же времени до температуры изотермического выдерживания (если эта тем-

пература не была еще достигнута). На последнем этапе подъем температуры может осуществляться с большей скоростью. Заданная прочность достигается бетоном к концу остывания до установленной температуры. Настоящий режим применяется, как правило, для электропрогрева предварительно напряженных железобетонных конструкций (рис. 1.1г);

- саморегулирующий режим. В этом случае изменение температуры бетона соответствует изменению удельной электрической проводимости бетона. Электропрогрев проводится при постоянном электрическом напряжении. Настоящий режим наиболее целесообразно использовать для прогрева бетона в стыках железобетонных конструкций. Заданная прочность достигается бетоном к моменту остывания до установленной температуры (рис. 1.1д);
- из двух периодов: изотермического выдерживания и остывания. При этом режиме необходимую прочность бетон приобретает к концу остывания. Данный режим применяется при использовании предварительно разогретых электрическим током бетонных смесей и при форсированном разогреве уложенного в опалубку бетона с повторным уплотнением его в горячем состоянии (рис. 1.1е).

При определенных условиях (например, при отсутствии на стройке специальных трансформаторов необходимой мощности с плавным или ступенчатым регулированием напряжения) вместо непрерывной может производиться импульсная подача энергии, осуществляемая периодическим включением-отключением напряжения, подаваемого на электроды или нагревательные элементы.

Тепловая энергия подается не постоянно, а отдельными импульсами, чередующимися с паузами. В период пауз, вследствие теплопроводности бетона, происходит равномерное перераспределение тепла по сечению конструкции, что обеспечивает более равномерное температурное поле. Подача напряжения импульсами продолжается и в период изотермического выдерживания. В этом случае длительность импульса сокращается, а период пауз увеличивается по сравнению с ними в стадии разогрева.

Продолжительность импульсов и пауз зависит от заданной скорости разогрева, температуры изотермического прогрева, модуля поверхности конструкции, подводимого напряжения и т.п. и обычно устанавливается или в соответствии с рекомендациями ППР или технологической карты. При отсутствии таких рекомендаций в этих документах пользуются рекомендациями специалистов Научно-исследовательских организаций.

§ 1-6. Расчет основных параметров прогрева бетона

К основным параметрам относятся температура бетона, время выдерживания, прочность бетона. Выбор температурных режимов прогрева бетона, как сказано выше, определяется различными факторами. Важное значение имеет охлаждаемая поверхность бетона, определяемая модулем поверхности конструкции.

При определении модуля поверхности конструкций сложного очертания ее необходимо разбивать на тела простой формы (куб, параллелепипед, пластина, цилиндр и т.д.) и для каждого из них определять модуль поверхности.

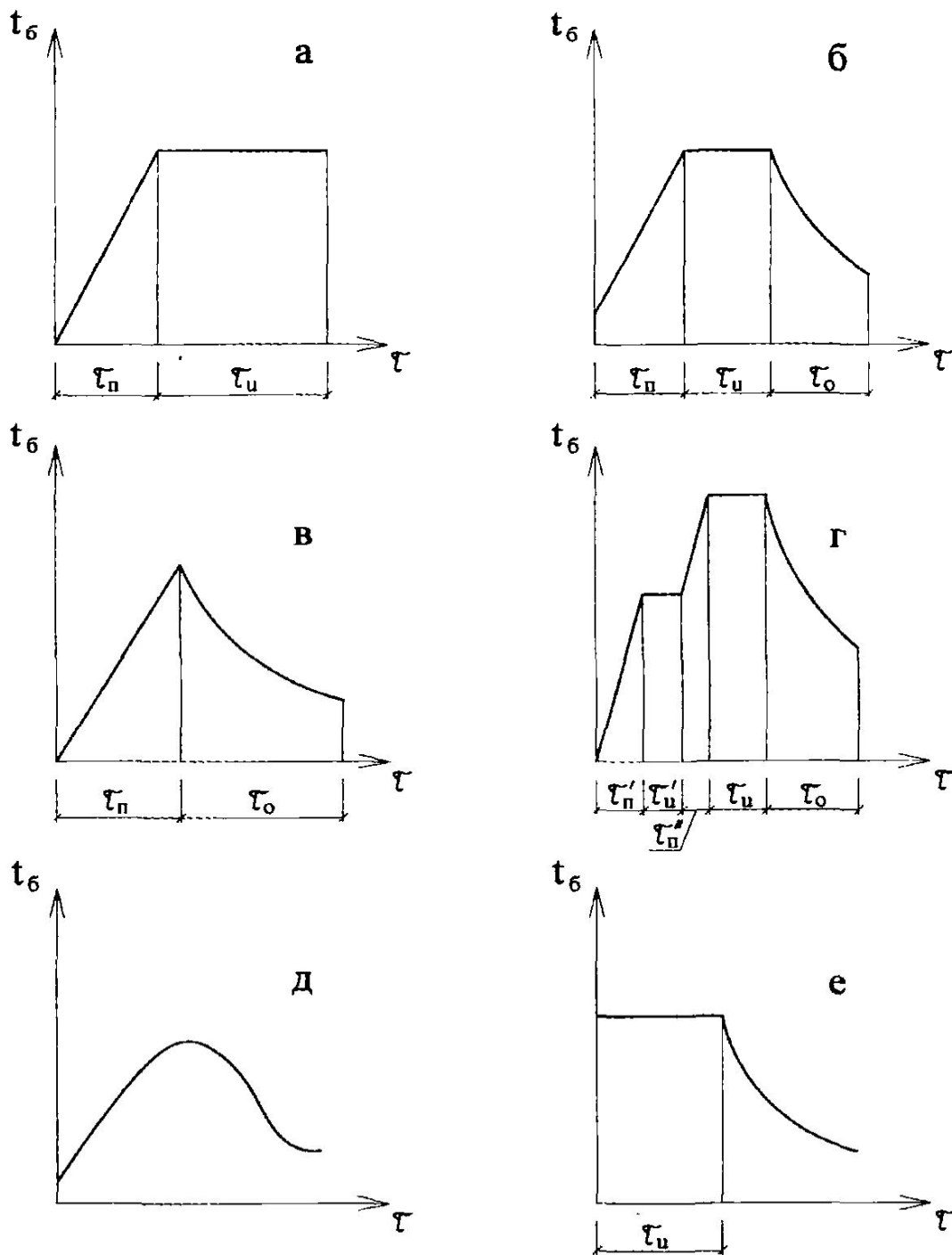


Рис.1.1 Режимы прогрева бетона.

а - разогрев и изотермический прогрев; б - разогрев, изотермический прогрев и регулируемое остывание; в - разогрев и регулируемое остывание; г - ступенчатый режим разогрева, изотермический прогрев и регулируемое остывание; д - саморегулирующий электронагрев при постоянном напряжении; е - изотермическое выдерживание с медленным остыванием.

В общем виде модуль поверхности определяется отношением суммы площадей охлаждаемых поверхностей конструкции к ее объему, причем при укладке бетонной смеси на талое основание поверхность конструкции, соприкасающаяся с ним, в ΣF не входит:

$$M_n = \frac{\Sigma F}{V} \quad (5)$$

Для колонн и балок прямоугольного сечения со сторонами a и b , м:

$$M_n = \frac{2}{a} + \frac{2}{b} \quad (6)$$

Для колонн и балок квадратного сечения со стороной a , м:

$$M_n = \frac{4}{a} \quad (7)$$

Для куба со стороной a , м:

$$M_n = \frac{6}{a} \quad (8)$$

Для параллелепипеда со сторонами a , b и c , м:

а) отдельно стоящего:

$$M_n = \frac{2}{a} + \frac{2}{b} + \frac{2}{c}; \quad (9)$$

б) прилегающему к массиву:

$$M_n = \frac{2}{a} + \frac{2}{b} + \frac{1}{c}; \quad (10)$$

Для плит и стен толщиной a , м:

$$M_n = \frac{2}{a}; \quad (11)$$

Для цилиндра с радиусом R и высотой c , м:

$$M_n = \frac{2}{R} + \frac{2}{c} \quad (12)$$

В расчетах прогрева бетона важное значение имеют теплофизические параметры – конвективная и лучистая составляющие, а также тепловыделение бетона за счет экзотермии.

Конвективная составляющая коэффициента теплопередачи α_k , Вт/(м²°С):

а) для тел прямоугольного и квадратного сечений

$$\alpha_k = \frac{4,32[(1,293 - 0,058t_{н.в})v]^{0.8}}{a^{0.2}}; \quad (13)$$

в) для цилиндра

$$\alpha_k = \frac{4,32[(1,293 - 0,058t_{н.в})v]^{0,8}}{R^{0,2}}, \quad (14)$$

где v – скорость ветра, м/с.

Лучистая составляющая коэффициента теплопередачи α_l , Вт/(м² °С)

$$\alpha_l = (4,6 + 0,045t_{н.в}) \times \varepsilon, \quad (15)$$

где ε – степень черноты полного нормального излучения материала опалубки (при расчетах можно принимать $\varepsilon = 0,65$).

Термическое сопротивление опалубки $R_{оп}$, (м² °С)/Вт

$$R_{оп} = \sum \delta_i / \lambda_i, \quad (16)$$

где δ_i – толщина i -го слоя опалубки, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя опалубки, Вт/(м °С).

Коэффициент теплопередачи опалубки $\alpha_{прив}$, Вт/(м² °С)

$$\alpha_{прив} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_l + \alpha_k} + R_{оп}} \quad (17)$$

Значение $\alpha_{прив}$ для некоторых типов опалубок приведены в табл. 1.2, коэффициент теплопроводности некоторых утеплителей (табл. 1.3).

Темп охлаждения конструкции m , ч⁻¹:

- для конструкций прямоугольного сечения

$$m = \frac{\alpha_{прив} M_n 3,6}{C_\delta \gamma_\delta \left(1 + 1,14 \frac{\alpha_{прив}}{\lambda_\delta M_n} \right)}; \quad (18)$$

- для конструкций типа пластины (плита, стена)

$$m = \frac{\alpha_{прив} M_n 3,6}{C_\delta \gamma_\delta \left(1 + 1,02 \frac{\alpha_{прив}}{\lambda_\delta M_n} \right)}; \quad (19)$$

- для цилиндрических конструкций

$$m = \frac{\alpha_{прив} M_n 3,6}{C_\delta \gamma_\delta \left(1 + 0,92 \frac{\alpha_{прив}}{\lambda_\delta M_n} \right)}; \quad (20)$$

где C_δ – удельная теплоемкость бетона, для тяжелого бетона $C_\delta = 1,05$ кДж/(кг · °С) (табл. 1.3);

γ_δ – удельный вес бетона, $\gamma_\delta = 2400$ кг/м³;

λ_δ – коэффициент теплопроводности бетона, $\lambda_\delta = 2,6$ Вт/(м · °С).

Таблица 1.2

Коэффициенты теплопередачи опалубок











№ п/п	Конструкция	Материал опалубки	Толщина слоя, мм	Коэффициент теплопередачи $\alpha_{прив}$ (Вт/м ² ·°С), при скорости ветра, м/с			
				0	2	5	15
1		Дерево Утеплитель Фанера	25 40 4	0,81	0,95	0,98	1,01
2		Фанера Утеплитель Фанера	12 40 4	0,86	1,03	1,06	1,09
3		Металл Утеплитель Фанера	3 40 4	0,92	1,11	1,15	1,18
4		Металл Утеплитель Фанера	3 30 4	1,13	1,42	1,49	1,51
5		Фанера Утеплитель Фанера	12 20 4	1,32	1,74	1,85	1,94
6		Дерево Толь Фанера	40 2 12	1,71	2,51	2,75	2,95
7		Дерево	40	2,00	3,17	3,56	3,90
8		Дерево	25	2,43	4,40	5,19	5,95
9		Фанера	12	2,98	6,63	8,60	10,9
10		Металл	3	3,80	12,5	21,9	47,4

Таблица 1.3

Коэффициенты теплопроводности некоторых утеплителей

№ п/п	Наименование утеплителя	Коэффициенты теплопроводности, Вт/м·°С
1	Вата минеральная ($\rho=150$ кг/м ³)	0,055
2	Маты минераловатные прошивные ($\rho=100$ кг/м ³)	0,048
3	Маты минераловатные прошивные ($\rho=200$ кг/м ³)	0,06
4	Маты минераловатные рулонные на синтетическом связующем ($\rho=50$ кг/м ³)	0,046
5	Опилки ($\rho=250$ кг/куб.м)	0,24
6	Пенопласт плиточный ($\rho=100$ кг/м ³)	0,043
7	Пенопласт ($\rho=40$ кг/м ³)	0,041

Тепловыделение бетона. Тепловыделение цемента учитывается при производстве бетонных работ методами термоса и предварительного разогрева коэффициентом

$$K_r = 1,33e - \frac{K_u (\alpha_{прив} M_n)^2}{M_u C}, \quad (21)$$

где $K_{ц}$ – коэффициент, зависящий от вида цемента (для бетонов на портландцементе $K_{ц} = 0,72$, на шлакопортландцементе - $K_{ц} = 0,98$);

$M_{п}$ – марка (активность) цемента, кг/см²;

$Ц$ – расход цемента на 1 м³ бетона, кг/м³.

Прочность бетона является наиболее важным показателем качества бетона. Основным способом определения прочности тяжелого бетона в производственных условиях является использование графических зависимостей прочности от температуры и времени твердения при соответствующих классах бетона.

На этапе прогнозирования прочности (при разработке технологических карт) следует применять расчетные формулы или руководствоваться графиками нарастания прочности бетона.

§ 1-7. Влияние режимов прогрева на формирование структуры бетона.

Физико-химические процессы структурообразования играют ведущую роль в создании прочного искусственного камня – бетона как при твердении в нормальных условиях, так и при тепловой обработке, определяя фазовый состав новообразований и микроструктуру цементного камня. Однако в последнем случае эти процессы сопровождаются еще чисто физическими явлениями, обусловленными характером накладываемого теплового воздействия. Для такой же многокомпонентной гетерофазной системы, как бетон, эти явления могут оказать более значительное влияние на прочность бетона, чем физико-химические процессы при твердении цементного камня.

Возникновение и развитие физических явлений в бетоне при его тепловой обработке создает в нем сложное напряженное состояние и наносит существенный ущерб формирующейся структуре материала, нарушая ее плотность. Дефекты структуры и пониженная плотность являются основными причинами недобора прочности в месячном возрасте и ухудшения других физико-механических свойств бетонов, подвергшихся термообработке, по сравнению с такими же бетонами нормального твердения.

Общим признаком развития физических явлений является накопление необратимых деформаций расширения, причем максимальные и остаточные деформации служат интегральным показателем степени нарушения структуры бетона.

Исследования показали, что при любой тепловой обработке наиболее интенсивное расширение бетона наблюдается в период подъема температуры. Максимальные деформации в этот период могут достигать 3-5 мм/м при пропаривании, 2,3-19 мм/м при автоклавной обработке и 2-10 мм/м при форсированном электропрогреве. Это говорит о том, что деструктивные явления наиболее сильно проявляются при нагреве, когда физический процесс температурного расширения может опережать химический и физико-химический процессы твердения. Поэтому при анализе причин и механизма возникновения структурных нарушений особенно в связи с использованием форсированного электропрогрева бетона необходимо подробно остановиться именно на периоде подъема температуры. Так как в этот период в основном происходит формиро-

вание структуры бетона, которая в дальнейшем лишь упрочняется. От качества образовавшейся в период нагрева структуры материала будут зависеть в основном все технические свойства бетона.

Деструктивные процессы, естественно, будут наблюдаться и при изотермическом выдерживании, хотя и в меньшей степени, и при остывании нагретого бетона. Однако, причины их вызывающие и механизм отрицательного воздействия на структуру материала будут идентичны как при использовании форсированного электроразогрева с последующим вибрированием, так и при любой другой тепловой обработке. Они обусловлены явлениями тепло- и массообмена, неравномерной усадкой заполнителя и окаймляющего его цементно-песчаного раствора вследствие различия их температурных деформаций. Поэтому нет надобности на них подробно останавливаться.

Как известно, бетонная смесь представляет собой многокомпонентную систему, состоящую из твердой, жидкой и газообразной фаз. Каждая из этих фаз обладает различными теплофизическими характеристиками и по-разному изменяется в объеме при изменении температуры.

Другими особенностями свежесформованного бетона являются непрерывное изменение реологического состояния системы, необратимый переход ее в процессе твердения из первоначального пластичновязкого состояния в упругохрупкое. Эти две особенности и определяют возникновение структурных нарушений в бетоне, твердеющем при тепловой обработке.

При нагревании свежесформованного бетона расширяются составляющие его компоненты – цемент, заполнители, вода и воздух. При этом твердая фаза, имея наименьший температурный коэффициент линейного расширения ($5-14 \cdot 10^{-6} \text{ м}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$), увеличивается в объеме весьма незначительно – всего на 0,15-0,2% при нагреве от 20 до 90⁰С. Вода расширяется в значительно большей степени – на 2,7 – 3% (т.е. в 15-20 раз больше, чем твердые составляющие), при чем интенсивность расширения увеличивается с повышением температуры [температурный коэффициент объемного расширения воды меняется от $0,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ в интервале от 5-10⁰С до $5,87 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ в интервале 60-80⁰С]. Еще большему расширению подвергается газовая фаза, которая имеет наибольший температурный коэффициент объемного расширения – 1/273 на 1⁰С: ее объем при повышении температуры с 20 до 90⁰С увеличивается на 22-25%, т.е. в 100-150 раз больше, чем твердых компонентов, и в 8-10 раз больше, чем воды. Из этого следует, что основную роль в объемных деформациях бетона при нагреве играет расширение воды, содержание которой в смеси составляет около 8-12%, и газовой фазы. При этом в состав последней необходимо включать не только воздух, вовлеченный при перемешивании смеси и заземленный при ее уплотнении, но и воздух, находящийся в порах и капиллярах заполнителя и адсорбированный на поверхностях твердых частиц. Общее содержание воздуха в бетонных смесях на плотных заполнителях может достигать 1,5-3% и даже до 5%. В бетонных смесях на пористых заполнителях суммарный объем газовой фазы еще больше – 40-50% общего объема. Следует также учесть, что некоторое количество воздуха находится в растворенном виде в воде затворения, который интенсивно переходит в свободное состояние при тепловых и вибрационных воздействиях.

Наличие такого большого объема воды и воздуха в бетоне весьма отрицательно сказывается на формировании его структуры во время тепловой обработки, так как термическое расширение их при нагреве создает в порах твердеющего материала значительное избыточное давление.

Негативное действие воды усугубляется частичным превращением ее в пар внутри бетона. Во-первых, сам процесс парообразования, как известно из физики, сопровождается увеличением объема в 1600-2000 раз, что при относительной замкнутости пор приводит к возникновению градиента давления. Во-вторых, в результате образования пара, имеющего примерно такой же температурный коэффициент объемного расширения, что и воздух, значительно увеличивается объем газовой фракции в бетоне, которая способна к наибольшему расширению при нагреве. При температурах свыше 60⁰С внутреннее испарение происходит особенно интенсивно.

Возникновению внутреннего давления способствует также миграция влаги вследствие наличия температурного и влажностного градиентов, как в самом бетоне, так и между бетоном и окружающей средой, а также в результате проталкивания воды по порам расширяющимся газом.

На возникающее в бетоне избыточное давление оказывает влияние много факторов: содержание воды и воздуха, структура пор и капилляров, параметры теплоносителя и условия теплообмена, темп нагрева и т.д. Вследствие этого величина избыточного давления не поддается пока теоретическому расчету. Отсутствие же методов и приборов не позволяет с достаточной точностью и достоверностью производить такие измерения экспериментально. Поэтому приводимые в ряде работ опытные значения избыточного давления весьма сильно различаются, однако они позволяют хотя бы примерно оценить их порядок.

Воздействие этого давления может создать в твердеющем материале такое напряженное состояние, при котором общие напряжения в сечении могут отсутствовать или быть весьма незначительными, в то время как в микрообъемах материала напряжения могут быть достаточно большими. Эти локальные (микроструктурные до терминологии Ю.А. Нилендера) напряжения или собственные напряжения второго рода в отличие от напряжений, возникающих под действием внешних сил (и развивающихся по всему сечению тела) появляются в еще неокрепших структурных связях материала стенок пор и капилляров, которые не в состоянии их воспринять. В результате этого происходят раздвижка твердых частиц, нарушение их связей, образование направленных пор, через которые избытки расширившегося газа выходят в окружающую среду. Дефекты структуры фиксируются при этом одновременно идущим процессом перехода системы из вязкопластичного состояния в упрягохрупкое.

О возникающих при нагреве структурных нарушениях свидетельствуют не только визуальные наблюдения, но и значение максимального избыточного давления, возникающего в бетоне при нагреве.

Расчеты показывают, что только в результате расширения паровоздушной смеси при нагреве в герметичном объеме с 20 до 100⁰С избыточное давление составило бы около 0,03 МПа. Приведенные же выше опытные значения максимального избыточного давления, возникающего в бетоне при нагреве, значительно отличаются от этого значения и соответствуют нагреву газа

в замкнутом объеме лишь до температур 25-40⁰С. Следовательно, расширение паро-воздушной фазы в бетоне не изохорный процесс. Оно протекает с увеличением первоначально занимаемого этой фазой объема вследствие раздвижки частиц, разрыхления материала и частично выхода газа по образующимся направленным капиллярам. Этим же объясняются и резкий спад внутреннего давления после достижения бетоном максимальной температуры изотермического прогрева и пики на кривых деформаций, т.е. имеет место релаксация.

Явление выхода воздуха из бетона в виде пузырьков на поверхности пропариваемых образцов наблюдалось многими исследователями. Особенно оно резко возрастает при температурах выше 80⁰С. Это явление подтверждается и исследованиями НИИЖБ (Б.А. Крылов, В.Д. Копылов), которые показали, что интенсивное удаление пузырьков газа из бетона при электроразогреве и в процессе последующего повторного вибрирования происходит при температурах выше 70⁰С.

Пары воды и воздуха в бетоне при нагреве движутся в основном вверх, в сторону открытой поверхности изделия, т.к. здесь, особенно у верхних слоев не ограниченных формой, требуются наименьшие усилия для их раздвижки и разрыхления. Поэтому визуально заметное вспучивание при нагреве и слоистость структуры материала наблюдаются только в верхних слоях. Для внутренних же зон вышележащие слои играют роль пригруза и препятствуют в какой-то степени развитию деструктивных явлений.

Изучение температурных деформаций бетонов при различных способах тепловой обработки показало, что остаточное расширение, характеризующее степень структурных нарушений, зависит от скорости нагрева и начальной прочности, достигнутой бетоном до наложения теплового воздействия. Установлено, что бетон, имеющий определенную начальную прочность, приобретает в процессе термообработки только деформации, соответствующие температурному расширению затвердевшего материала. Объясняется это тем, что такой бетон воспринимает возникающие в результате нагрева внутренние напряжения, снижая тем самым их деструктивное воздействие. Исходя из этих представлений С.А. Мироновым и Л.А. Малининой введено понятие о «критической» прочности – минимальной прочности бетона, при которой наложение теплового воздействия не приводит к структурным нарушениям. Расширение бетона с такой прочностью практически равно температурному расширению затвердевшего бетона того же состава.

Необходимая критическая прочность бетона зависит от состава бетона (содержания газовой и жидкой фаз) и интенсивности теплового воздействия (скорости подъема температуры).

Из вышеизложенного непосредственно вытекают общеизвестные пути уменьшения структурных нарушений в бетоне при тепловой обработке: во-первых, предварительное выдерживание, обеспечивающее достижение начальной прочности, равной критической, уменьшение свободной воды вследствие химического связывания в новообразованиях, физического связывания поверхностью субмикроструктур новообразований и частичного испарения вследствие внешнего массообмена; во-вторых, уменьшение скорости подъема температуры, в результате которых прирост прочности бетона во времени будет опережать прирост возникающего в нем внутреннего давления, обеспечи-

вая тем самым необходимое сопротивление этому давлению. Кроме того, при малых скоростях нагрева избыточное давление не будет достигать больших значений из-за частичной релаксации.

До последнего времени все рекомендуемые оптимальные режимы тепловой обработки строились с учетом этих двух требований. Однако длительные сроки предварительного выдерживания не всегда осуществимы, а малые скорости подъема температуры приводят к увеличению общего цикла тепловой обработки. Поэтому они неприемлемы для современного производства бетонных работ, тем более в зимнее время, требующего значительной интенсификации технологического процесса на всех его этапах.

Чтобы отказаться от длительного предварительного выдерживания и в тоже время избежать структурных нарушений, НИИЖБом (работа проводилась Л.А. Малининой) на основании изучения взаимосвязи между критической прочностью бетона и его деформациями предложены ступенчатые режимы нагрева и режимы с прогрессивно возрастающей скоростью подъема температуры. При этом предполагается, что на начальной стадии нагрева, когда свежесформированный бетон не имеет еще достаточной прочности, скорость подъема температуры должна быть минимальной. Однако со временем прочность бетона повышается, что допускает применение более высокого темпа нагрева.

Однако ступенчатые режимы и режимы с прогрессивно возрастающей скоростью подъема температуры не позволяют полностью исключить развитие структурных нарушений в бетоне и максимально ускорить процесс нагрева. С повышением скорости подъема температуры в бетоне возрастает температурный градиент и интенсифицируется внутреннее испарение влаги. В этом случае процесс упрочнения структуры бетона будет все больше отставать от интенсивности развивающихся физических явлений. Следовательно, деструктивное воздействие последних на формирующуюся структуру бетона будет усиливаться. Таким образом, прогрев бетона в монолитных конструкциях должен осуществляться по мягким режимам со скоростью подъема температуры 10-15⁰С/ч (но не более 20⁰С/ч) до температуры изотермического прогрева.

§ 1-8. Методы тепловой обработки бетона в монолитных конструкциях.

Прогрев бетона в монолитных конструкциях может осуществляться различными методами, каждый из которых имеет свою наиболее рациональную область применения. Перспективные методы, изложенные в настоящем "Руководстве", будут еще длительное время применяться в строительстве и конкуренцию им в будущем могут составить эффективные добавки ускорители твердения и особо быстро твердеющие вяжущие, которые возможно будут в текущем столетии разработаны.

Методы тепловой обработки бетона в монолитных конструкциях за редким исключением основаны на применении электрической энергии, позволяющей легко контролировать процесс прогрева, управлять им, а в перспективе – автоматизировать его. В таблице 1.1 приведены краткие данные методов тепловой обработки. Каждый из методов имеет свои разновидности, о которых будет сказано в соответствующих разделах "Руководства".

Тепловая обработка бетона путем электродного прогрева. Электродный прогрев или его обычно называют электропрогрев, основан на принципе включения уложенного в конструкцию бетона в электрическую цепь как сопротивления. При прохождении через него электрического тока выделяется тепло, нагревающее бетон и ускоряющее тем самым процесс твердения. Электропрогрев имеет разновидности, которые применяются в строительстве при возведении различных конструкций – прогрев стержневыми и ленточными электродами. Электропрогрев один из наиболее экономичных по расходу электроэнергии методов термообработки, поскольку тепло выделяется внутри бетона и в максимальной степени используется для его разогрева. При применении стержневых электродов прогрев происходит по всей массе, при применении ленточных (нашивные на опалубку) или напыленных электродов, прогрев может быть сквозной или периферийный. При использовании последнего, бетон прогревается только в поверхностных слоях; внутренние слои нагреваются за счет теплопроводности от поверхностных, экзотермии цемента и частично за счет омического сопротивления при прохождении электрического тока.

Арматура железобетонных конструкций оказывает большое влияние на формирование электрического и температурного полей, может резко их искажать, приводя к неравномерности прогрева. Именно характер армирования конструкций и определяет рациональную область применения этого метода.

Как показывают исследования и накопленный опыт использования электропрогрева, он эффективен при прогреве бетона в неармированных или слабоармированных конструкциях. Конструкции, с неравномерно расположенной по сечению и весьма насыщенные стальной арматурой, армированные прокатными профилями, имеющие сложные очертания с густыми арматурными каркасами, электродным методом прогревать нецелесообразно из-за возможности замыкания электродов на арматуру и неравномерности прогрева. Стержневые или струнные электроды, установленные в бетон, так в нем и остаются и относятся к элементам одноразового применения.

Тепловая обработка с использованием предварительного разогрева бетонных смесей. Предварительный электроразогрев бетонных смесей был предложен в 60-е годы Арбеневым С.А. и с тех пор прочно занял свое место среди методов ускорения твердения бетона. Попытки предварительного разогрева бетонных смесей на заводах паром, себя не оправдали и, такой способ заметного практического применения не нашел. Разогрев бетонной смеси электрическим током себя полностью оправдал и метод стал применяться при возведении массивных частей зданий и сооружений из монолитного железобетона. Этот метод по расходу электроэнергии является самым экономичным, ибо электрическая энергия превращается в тепловую непосредственно в бетоне и по всей его массе. Поскольку разогрев длится короткое время от 3 до 15 мин., то теплопотери в окружающую среду сводятся к минимуму.

Разогретую смесь очень важно быстро уложить в опалубку, уплотнить и укрыть теплоизоляцией, обеспечивая твердение бетона за счет внесенного при прогреве и экзотермического тепла, выделяемого при гидратации цемента с дальнейшим выдерживанием по методу термаса. При этом теплопотери в окружающую среду должны быть значительно меньше поступающих за счет экзотермии. По этой причине рациональной областью применения метода пред-

варительного электроразогрева бетона является возведение массивных и средней массивности конструкций при близких к 0⁰С отрицательных температурах.

Предварительный электроразогрев бетона требует строгого соблюдения техники безопасности, поскольку разогрев осуществляется электрическим током напряжением 220-380В.

Тепловая обработка бетона путем прогрева греющими изолированными проводами. Греющие провода устанавливаются непосредственно в конструкцию до укладки бетона, после чего на них подается электрический ток и они начинают нагреваться. Для обеспечения надлежащего сопротивления жила провода делается стальной. Всё выделение тепла происходит непосредственно в массе бетона и греющий провод при таком применении можно отнести к внутренним источникам тепла или внутренним теплогенераторам. Это делает метод одним из наиболее эффективных по сравнению с обогревом бетона внешними источниками тепла. Обеспечение равномерности прогрева бетона достигается установкой провода с необходимыми расстояниями струн друг от друга. Метод может применяться для прогрева бетона в любых конструкциях независимо от их насыщенности арматурой и конфигурации. К сожалению установленный в бетон провод остается в нем и является нагревателем одноразового применения.

Тепловая обработка бетона с применением наружных источников тепла. Наружные источники тепла весьма разнообразны и могут быть в виде греющих опалубок и греющих матов. Греющие опалубки снабжаются разными видами источников тепла, размещаемыми с внутренней стороны палубы и укрываемыми теплоизоляцией во избежание больших теплопотерь в окружающую среду. В качестве нагревателей удобно применять греющий провод или греющие плоские элементы, наклеиваемые через слой электроизоляции непосредственно на палубу. На поверхности опалубки, соприкасающейся с бетоном, температура не должна превышать 80⁰С, должна быть равномерной во всех точках и разброс не должен быть более 5⁰С.

Греющие маты могут иметь разную конструкцию, в которых греющими элементами являются металлические сетки, проволока, греющий провод и др. Нагреватели тщательно изолируются и крепятся на гибкую основу (брезент, термостойкая резина). При установке греющих матов на поверхность бетона на них рекомендуется укладывать теплоизоляцию с целью резко снизить теплопотери в окружающую среду.

Обогрев бетона с помощью наружных источников тепла в виде греющих опалубок и греющих матов в основном сводится к контактной (кондуктивной) подаче тепла на поверхность прогреваемой конструкции, поскольку нагреватели в них являются низкотемпературными. Такая подача тепла обеспечивает эффективный прогрев бетона примерно на глубину до 20 см. Если конструкция имеет толщину более 20 см, то ее целесообразно прогревать с двух сторон.

Прогрев бетона наружными источниками тепла удобен при возведении любых конструкций независимо от характера армирования и насыщенности арматурой.

Помимо низкотемпературных нагревателей иногда применяют высокотемпературные в виде ламп инфракрасного излучения, селитовых и других излучателей. Такие нагреватели устанавливаются на определенном расстоянии от

опалубки и за счет радиации (излучения) тепло подается на ее тыльную поверхность с таким расчетом, чтобы на контакте с бетоном температура на опалубке не превышала 80°C . Следует отметить, что этот метод требует более высоких затрат энергии, более сложного и дорогостоящего оборудования и связан с большими потерями тепла в окружающую среду. В следствие чего в отечественной практике для прогрева монолитных конструкций применяется крайне редко.

Тепловая обработка железобетонных конструкций в электромагнитном поле (индукционный прогрев). Индукционный прогрев железобетонных конструкций является оригинальным методом, основанным на нагреве элементов стальной арматуры в электромагнитном поле. Нагреваемая арматура передает тепло окружающему ее бетону контактным способом. Это и определяет целесообразную область применения метода – для прогрева густоармированных железобетонных конструкций с равномерным распределением арматуры по сечению. Индукционный метод удобен для прогрева конструкций трубчатого типа, которые достаточно насыщены и с равномерно распределенной арматурой при небольшой толщине стенки (например, железобетонные трубы). Хорошо зарекомендовал себя такой способ прогрева при заделке стыков сборных железобетонных конструкций, которые имеют выпуски стальной арматуры. Индуктор не только нагревает арматуру в заделке, но и на требуемую глубину в стыкуемых железобетонных элементах (обычно требуется не менее 30 см). В случае применения стальной опалубки имеет место экранирование электромагнитного поля и нагрев опалубки. От нагревающейся опалубки происходит нагрев бетона, а от него арматуры.

Индукционный прогрев довольно трудоемок при установке индуктора, требует повышенного расхода электроэнергии и поэтому применяется довольно редко, в основном для прогрева указанных конструкций.

Тепловая обработка бетона воздушным конвективным методом с помощью теплогенераторов. Прогрев бетона при применении этого метода происходит нагреваемым воздухом или продуктами сгорания топлива. Тепло подается к поверхности прогреваемой конструкции за счет кондукции и конвекции. Поскольку теплоемкость нагреваемого воздуха или продуктов сгорания невелика, то прогрев таким методом требует больше времени из-за невысокой температуры прогрева (обычно $40\text{--}50^{\circ}\text{C}$) при значительном расходе электрической энергии или сжигаемого топлива. Прогрев конструкций с неопалубленной поверхностью нагретыми газами нежелателен из-за быстрого испарения влаги с поверхности бетона и опасности его обезвоживания. Такой метод относительно эффективным может быть только в полностью закрытых помещениях (по существу тепляки).

Комбинированные методы тепловой обработки бетона. Комбинированные методы разнообразны, но наиболее часто встречается прогрев бетона с противоморозными добавками. В сильные морозы укладываемая в густоармированные вертикальные конструкции (колонны, стены и др.) бетонная смесь при соприкосновении с холодным металлом замерзает на контакте с арматурой и опалубкой, и не всегда доходит полностью до низа. Это приводит к непробетонированию нижней части конструкций, образованию больших пазух и каверн, которые резко снижают несущую способность конструкции и их очень

неудобно и трудоемко заделывать. Для таких конструкций в бетонную смесь вводится небольшое количество противоморозной добавки-антифриза (нитрит натрия, Асол-К и др.) в количествах 2-4% от массы цемента. Такой прием позволяет бетонной смеси в процессе укладки не терять свои пластические свойства и не намерзать на замороженную арматуру и опалубку. После укладки в конструкцию и уплотнения бетон с добавками-антифризами подвергается прогреву.

Возведение некоторых конструкций большой высоты требует устройства тепляков (железобетонные трубы, ядра жесткости зданий и др.). Температуру в таких тепляках с помощью калориферов поддерживают на уровне до 15-25⁰С. При более высоких температурах, рабочим, одетым в зимнюю одежду, работать становится некомфортно. Бетон же при такой температуре твердеет медленно и требует много времени до распалубки. В таких случаях бетон в тепляках приходится дополнительно прогревать. Чаще используют для этой цели греющую опалубку, греющий провод, а при небольшом армировании – электродный прогрев.

Комбинированный метод термообработки бетона может быть использован и при возведении массивных конструкций. Если конструкция среднего модуля поверхности ($M_n = 6-8м^1$) была забетонирована предварительно разогретой смесью и, резкое падение температуры окружающего воздуха вызвало опасность преждевременного замерзания поверхностных слоев бетона, приходится осуществлять дополнительно периферийный прогрев конструкции. Однако в этом случае температура бетона в поверхностных слоях не должна превышать температуру внутренних слоев бетона. Несоблюдение такого режима прогрева может вызвать неблагоприятное термонапряженное состояние в конструкции и в результате привести к появлению трещин на ее поверхности.

Комбинированный метод обеспечения твердения бетона может быть использован при выдерживании его с противоморозной добавкой. Если температура среды резко упала значительно ниже расчетной температуры, на которую была рассчитана добавка, то во избежание преждевременного замерзания бетона необходимо конструкцию прогревать. В таком случае в бетоне достаточно поддерживать температуру до 20⁰С, для чего большого расхода энергии не требуется.

На практике при возведении железобетонных конструкций в зимнее время могут применяться и другие комбинации различных методов интенсификации твердения бетона. Выбор их зависит от вида конструкции, температуры и даже силы ветра окружающей среды, а также имеющихся на объекте энергетических возможностей, материалов и оборудования. Главное - хорошо знать методы, чтобы их комбинации грамотно применять.

Глава 2. ЭЛЕКТРОПРОГРЕВ БЕТОНА

§ 2-1. Общие положения

Электропрогрев (электродный прогрев) - способ ускорения твердения бетона, заключающийся в нагревании его электрическим током промышленной частоты, пропускаемым непосредственно через бетон. В этом случае прогреваемый бетон в конструкции включается в электрическую цепь как сопротивление и преобразование электрической энергии в тепловую происходит внутри бетона.

Электродный прогрев (электропрогрев) бетона применяется с 1932 г. в нашей стране и является одним из эффективных способов ускорения твердения бетона при возведении бетонных и железобетонных монолитных конструкций при строительстве в зимних условиях. Этот способ предохраняет конструкции от преждевременного замораживания и обеспечивает получение требуемой прочности бетона в короткие сроки.

Электропрогрев применяется для ускорения твердения бетона в конструкциях с модулем поверхности выше 5, а также в более массивных конструкциях, когда нет гарантии обеспечения требуемой теплозащиты при выдерживании бетона методом "термоса" или, когда необходимо получить заданные прочности в более короткие сроки.

Кратковременный электропрогрев бетона целесообразно применять также в осенний и весенний периоды, когда понижение температуры наружного воздуха (особенно в ночные часы) может значительно отодвинуть сроки расплывания или загрузки конструкции.

Электропрогрев бетона, вследствие выделения тепла непосредственно в теле бетона, позволяет затрачивать наименьшее количество электроэнергии по сравнению с другими способами электротермообработки бетона.

При электропрогреве бетона целесообразно использовать максимально допустимые температуры прогрева, что обеспечивает наименьшую длительность прогрева конструкции.

Однако, наряду с преимуществами, электропрогрев бетона имеет и определенные недостатки:

- во избежание быстрого существенного расширения бетона и негативного влияния на его структуру разогрев необходимо вести медленно, что увеличивает продолжительность периода прогрева;
- нецелесообразно использовать его для термообработки конструкций с высоким процентом армирования и конструкций, армированных пространственными каркасами, т.к. в этом случае имеет место большая неравномерность температурного поля (перегрев бетона в зоне между арматурой и электродами и недогрев в межарматурной зоне).

Электродный прогрев бетона подразделяется на сквозной (рис.2.1) и периферийный (рис.2.2). Сущность сквозного электропрогрева заключается в пропускании электрического тока через весь объем бетона прогреваемой конструкции. Электрический ток проходит через бетон между электродами, располагаемыми на противоположных гранях прогреваемого конструктивного элемента или устанавливаемыми непосредственно в бетон. Подведение элек -

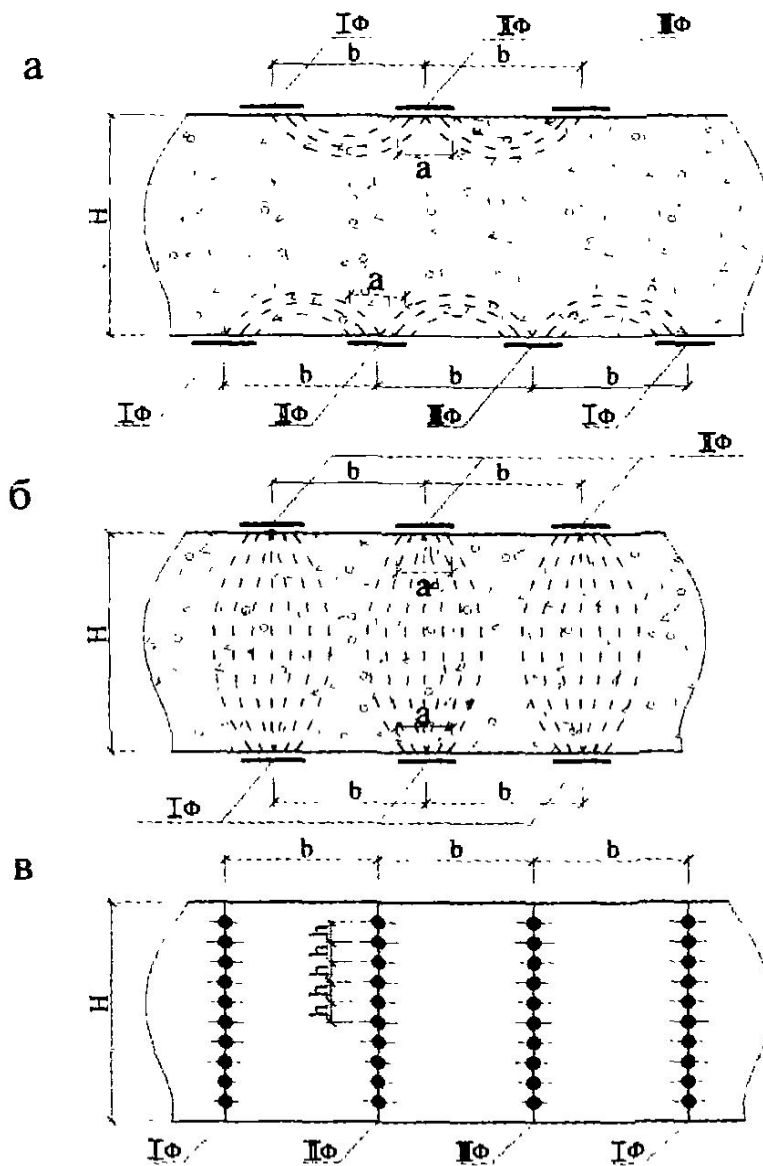


Рис.2.1 Схемы размещения полосовых электродов при сквозном и периферийном электропрогреве:

а - двусторонний периферийный электропрогрев; б - сквозной электропрогрев; в - размещение стержневых электродов плоскими группами; H - ширина (толщина) конструкции; a - ширина электродной полосы (ленты); b - расстояние между электродами и плоскими электродными группами; h - расстояние между электродами в группе; Φ - фаза.

трического тока к бетону при сквозном электропрогреве осуществляется с помощью электродов (рис.2.1). Основным свойством, обуславливающим прохождение электрического тока является электропроводность бетона или обратная ей характеристика – удельное электрическое сопротивление, которое в зависимости от различных факторов колеблется в пределах от 5 до 20 Ом · м. Поэтому, для обеспечения эффективного прогрева расстояние между электродами определяется в соответствии с типом электродов и на основе электрофизических свойств бетона при условии напряжения в сети не более 120 В, но в любом случае оно не должно превышать 50 см.

Сущность периферийного электропрогрева заключается в пропускании электрического тока через поверхностные зоны конструкции, которые нагреваются вследствие выделения джоулева тепла. Остальной объем бетона нагревается за счет передачи тепла из этих зон вследствие теплопроводимости и экзотермического тепловыделения при твердении бетона.

В качестве электродов для периферийного прогрева могут использоваться металлические полосы (полосовые электроды) и стержни (стержневые электроды), размещенные на внешней поверхности опалубки (обращенной к бетону) или специальных щитах, накладываемых на неопалубленные поверхности конструкций. При этом соседние электроды присоединяются к разным фазам (рис.2.2). Толщина активно прогреваемого слоя бетона (вследствие непосредственного прохождения электрического тока) составляет около 0,6 расстояния между соседними электродами, но не превышая 20 см, что определяется электрофизическими характеристиками и структурой материала.

Поэтому, при толщине конструкции до 20 см одностороннее расположение электродов обеспечивает прогрев всего объема бетона. При толщине конструкции до 40 см двухстороннее расположение электродов (по двум противоположным сторонам) позволяет подвергать активному прогреву всю конструкцию.

При большей толщине конструкции электроды целесообразно размещать по ее периметру. В этом случае активно прогревается слой бетона толщиной 20 см по периметру конструкции, а остальной объем прогревается за счет теплопередачи и экзотермического тепла, выделяемого при твердении бетона.

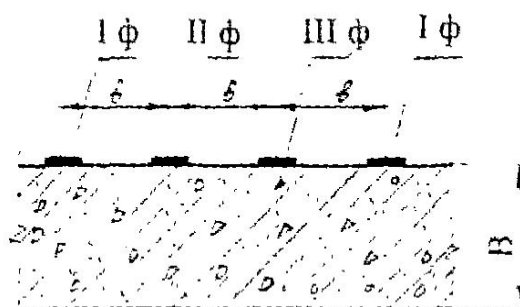


Рис. 2.2. Схема одностороннего размещения полосовых электродов при периферийном электропрогреве.

В – ширина прогреваемой конструкции; в – расстояние между пластинчатыми электродами; ф – фаза электрического трехфазного тока.

Таблица 2.1

**Удельное электрическое сопротивление тяжелых бетонов на портландцементях
разных заводов**

Завод – изготовитель цемента	Величины удельного электрического сопротивления бетона, Ом · м	
	Начального	Минимального
Акмянский	8,9	6,5
Алексеевский	7,4	4,9
Авросиевский	4,8	3,5
"Арагат"	8,4	6,0
Белгородский	18,8	12,2
"Большевик"	12,4	8,6
Брянский	11,6	8,1
Воркутинский	8,7	6,2
Воскресенский	7,2	4,9
"Гигант"	10,0	6,0
Жигулевский	9,6	7,4
Каспский	6,6	5,0
Николаевский	6,2	4,0
Новоздолбуновский	11,6	9,4
Новотроицкий	12,1	6,7
Подольский	11,5	9,7
Первомайский	9,8	6,6
Ростовский	8,5	7,2
Себряковский	14,0	9,9
Сенгилеевский	23,4	16,3
Сланцевский	3,0	2,0
Спасский	8,0	4,9
Сухоложский	10,6	6,9
Ульяновский	7,4	4,8
Чернореченский	7,9	5,5

Примечание. Приведенные величины являются ориентировочными. Они получены для бетонов с расходом цемента 415 кг/м³ и воды 185 л/м³ при температуре изотермического прогрева 70⁰С. Величины ρ могут изменяться при поступлении на завод сырья из другого карьера или при изменении схемы отсоса газов и пыли в обжиговых печах.

§ 2-2. Удельное электрическое сопротивление бетона.

Проводником электрического тока при электродном прогреве является жидкая фаза, представляющая собой воду с растворенными в ней минералами цементного клинкера. Твердые компоненты – сухие зерна цемента и заполнителей – практически не проводят электрический ток. Электропроводность бетона обуславливается качеством и количеством жидкой фазы. Однако в расчетах электрических параметров электропрогрева используют характеристику обратную электропроводности – удельное электрическое сопротивление (ρ). Удельное электрическое сопротивление представляет собой сопротивление прохождению электрического тока через кубик бетона с размером ребра в 1 см. На величину электрического сопротивления жидкой фазы существенное влияние оказывает содержание щелочей в цементе.

Разница в значениях ρ бетонов, приготовленных на портландцементях одинакового минералогического состава, но содержащих различное количество щелочей, может достигать 5 раз (табл.2.1).

Увеличение количества жидкой фазы в бетоне вызывает уменьшение ρ , а уменьшение количества жидкой фазы – его увеличение.

Так, например, увеличение водосодержания с 135 до 225 л на м³ бетона приводит к снижению ρ в 2,4 ... 2,6 раза.

Введение в бетон химических добавок – электролитов, приводит к уменьшению ρ . Причем, снижение ρ тем больше, чем выше значение ρ бетона без добавок (табл.2.2). Введение поверхностно-активных или воздухововлекающих добавок не изменяет ρ .

Удельное электрическое сопротивление бетона на гидравлическом вяжущем не является величиной постоянной, а изменяется в процессе его твердения (рис.2.3).

Таблица 2.2

Ориентировочное уменьшение величины удельного электрического сопротивления бетона в зависимости от вида и количества применяемых добавок.

Наименование добавки	Количество добавок (% от веса воды затворения)					
	0	0,5	1	1,5	2	3
Хлористый кальций Ca Cl ₂	1	0,85	0,70	0,60	0,50	0,40
Хлористый натрий Na Cl	1	0,80	0,60	0,50	0,45	0,35
Хлорное железо Fe Cl ₃	1	0,88	0,77	0,69	0,62	0,53
Азотистокислый натрий (нитрит натрия) Na NO ₂	1	0,84	0,69	0,58	0,49	0,39
Азотнокислый кальций (нитрат кальция) Ca (NO ₃) ₂	1	0,86	0,72	0,63	0,54	0,48

Примечание. В таблице указаны отношения величин ρ бетона с добавкой к ρ бетона без добавки.

Процесс изменения ρ характеризуется тремя периодами. Сразу после затворения цемента водой происходит уменьшение ρ до величины, равной 0,6... 0,85 от начального значения (первый период). Происходит это вследствие увеличения концентрации электролитов в жидкой фазе, а при электропрогреве и подвижности ионов в связи с повышением температуры бетона. Эту величину ρ принято называть минимальным удельным электрическим сопротивлением бетона (ρ мин.).

Второй период характеризуется определенным балансом, при котором величина ρ на какое-то время стабилизируется. Подобное состояние объясняется следующим: уменьшение ρ вследствие увеличения концентрации ионов в жидкой фазе компенсируется увеличением ρ из-за постепенного снижения ее количества.

В третьем периоде величина ρ постоянно возрастает вследствие интенсификации уменьшения количества жидкой фазы из-за химического и адсорбционного связывания воды и испарения ее в окружающую среду, а также нарушения сплошности наполненных жидкой фазой капилляров, что препятствует прохождению электрического тока. Интенсивность роста ρ обуславливается скоростью гидратации цемента, темпом твердения бетона и уменьшением водосодержания.

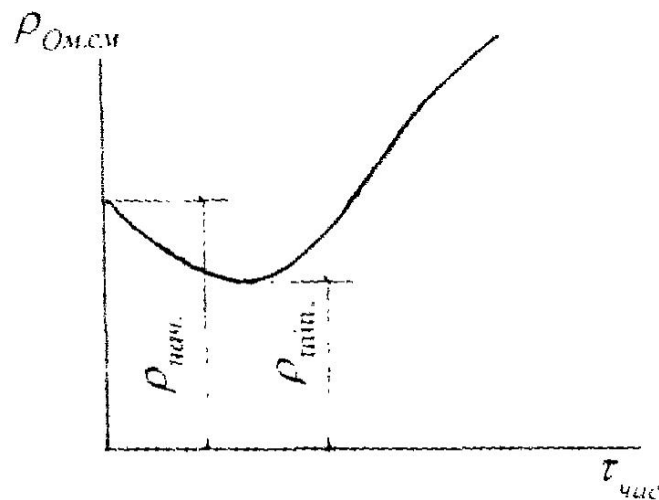


Рис. 2.3. Характер изменения удельного электрического сопротивления бетона.

Удельное электрическое сопротивление бетонов на пористых заполнителях зависит от тех же факторов, что и бетонов на плотных заполнителях. Однако имеется некоторая специфика в изменении ρ . Так, в начальный период прогрева ρ бетонов на пористых заполнителях выше, чем обычных бетонов с таким же расходом цемента и воды, что обуславливается поглощением жидкой фазы пористыми заполнителями. По мере подъема температуры жидкая фаза вытесняется из заполнителя в межзерновое пространство бетона вследствие расширения заземленного в его порах воздуха, и величина ρ соответственно понижается.

В практике электропрогрева имеют место случаи «самоотключения» бетона до момента приобретения им требуемой (заданной) прочности. Одной из причин этого является интенсивное увеличение ρ вследствие испарения влаги и достижение таких его величин, при которых электрический ток принятого напряжения не может такое сопротивление бетона преодолеть.

При электропрогреве увеличение скорости разогрева даже до $30^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ практически не влияет на ρ и его минимальная величина достигается, как правило, к моменту приобретения бетоном температуры $50 \dots 60^{\circ}\text{C}$.

Величины начального ($\rho_{\text{нач}}$) и минимального ($\rho_{\text{мин}}$) удельного электрического сопротивления бетона являются изменяющимися характеристиками и зависят от целого ряда факторов (водосодержания, состава цемента, температуры, пористости заполнителя, условий твердения и др.): для наиболее широко применяемых бетонов $\rho_{\text{нач}}$ колеблется в пределах от 4 до 25 Ом·м, а $\rho_{\text{мин}}$ – от 2,5 до 20 Ом·м.

Указанные величины удельного электрического сопротивления относятся к уплотненному бетону, но с достаточной для практических целей точностью могут быть применимы и к бетонным смесям.

Существующее требование о необходимости начала прогрева бетона до момента достижения им $t = +3^{\circ}\text{C}$, обуславливается не только опасением случайного замерзания бетона (с вытекающими негативными последствиями), но и тем, что при понижении температуры бетона его удельное электрическое сопротивление, а, следовательно, и общее электрическое сопротивление, возрастают, поскольку замерзшая вода плохо проводит электрический ток. И при достижении в поверхностных слоях конструкции температуры $-4 \dots -5^{\circ}\text{C}$ ρ составляет до $10^4 - 10^5$ Ом·см (т.е. 10000 – 100000 Ом·см). При t бетона в поверхностных слоях около 0°C ρ составляет 3000 – 4000 Ом·см, что вызывает определенные трудности при разогреве (необходимо использовать более высокое напряжение, что не всегда возможно).

Использование при определении параметров электропрогрева величины ρ , не соответствующей действительным электрофизическим характеристикам бетона, приводит к отклонению от заданного режима прогрева. Если использование в расчетах меньшей величины ρ приводит к уменьшению скорости разогрева, что не скажется отрицательно на качестве бетона, а только несколько увеличит продолжительность термообработки, то завышение в расчетах ρ по сравнению с действительным значением, вызовет увеличение скорости разогрева и, следовательно, приведет к снижению качества бетона.

Поэтому, для уточнения параметров прогрева перед его началом необходимо уточнить величину ρ путем опытного определения, что выполняется лабораторией.

При организации электропрогрева в практических расчетах и, в первую очередь, для подбора электротехнического оборудования, целесообразно применять расчетное удельное электрическое сопротивление бетона ($\rho_{\text{расч}}$), равное полу-сумме величин начального и минимального удельного сопротивления:

$$\rho_{\text{расч}} = (\rho_{\text{нач}} + \rho_{\text{мин}}) / 2$$

Для предварительных расчетов при известном $\rho_{нач}$ и неизвестном $\rho_{мин}$ можно принять:

$$\rho_{расч} = 0,85 \cdot \rho_{нач} \text{ (для тяжелых бетонов)} \text{ и } \rho_{расч} = 0,8 \cdot \rho_{нач} \text{ (для легких бетонов)}.$$

Определение удельного электрического сопротивления бетона строительной лабораторией производится до начала электропрогрева по методике, изложенной в Приложении.

§ 2-3. Электроды.

Напряжение к бетону прогреваемой конструкции подводится с помощью электродов, тип и размещение которых должны обеспечивать:

- соответствие мощности, выделяемой в бетоне при электропрогреве, мощности, требуемой по тепловому расчету;
- равномерность электрического и, следовательно, температурного полей;
- минимальный расход металла, для чего предпочтение следует отдавать электродам, размещаемым на опалубке.

В качестве электродов используют (табл.2.3):

- пластины, располагаемые на двух противоположных плоскостях конструкции и подключаемые к разным фазам;
- полосы, представляющие собой модификацию пластинчатых и используемые с целью экономии металла. В качестве полосовых электродов применяют стальные полосы шириной 20-50 мм и $\delta = 1-3$ мм и используют только как наружные, прикрепляемые к опалубке с расстоянием между полосами 20-30 см (рис.2.1 А, Б);
- стержни $\varnothing 6-12$ мм, которые погружают в бетон после укладки смеси и ее уплотнения с расстоянием между стержнями 20-30 см. Стержневые электроды являются внутренними и остаются в бетоне по окончании прогрева. При прогреве неармированных или слабо армированных конструкций целесообразно размещать стержневые электроды плоскими электродными группами (рис.2.1 В); длина стержневых электродов, устанавливаемых в бетон, обычно не превышает 50 см, поскольку при большей длине установить их в уложенный и уплотненный бетон трудно;
- струны – стальные прутки, устанавливаемые в бетоне вдоль оси конструкции (рис.2.4 и 2.5);
- напыленные – напыляются цинком на деревянную, бетонную или пластмассовую опалубку в виде лент, шириной 30...50мм и толщиной 50-100микрон.

Электроды делают из стали; их нельзя делать из алюминия, который вступает в химическую реакцию с гидроксидом кальция с выделением водорода, экранирующего поверхность электрода.

Пластинчатые электроды обеспечивают наиболее равномерное температурное поле в бетоне. Они применяются только как наружные. Пластинчатые электроды используют для прогрева конструкций толщиной до 50 см. При большей толщине конструкции (расстоянии между электродами) невозможно обеспечить соблюдения заданного режима прогрева при используемых для электропрогрева напряжениях.

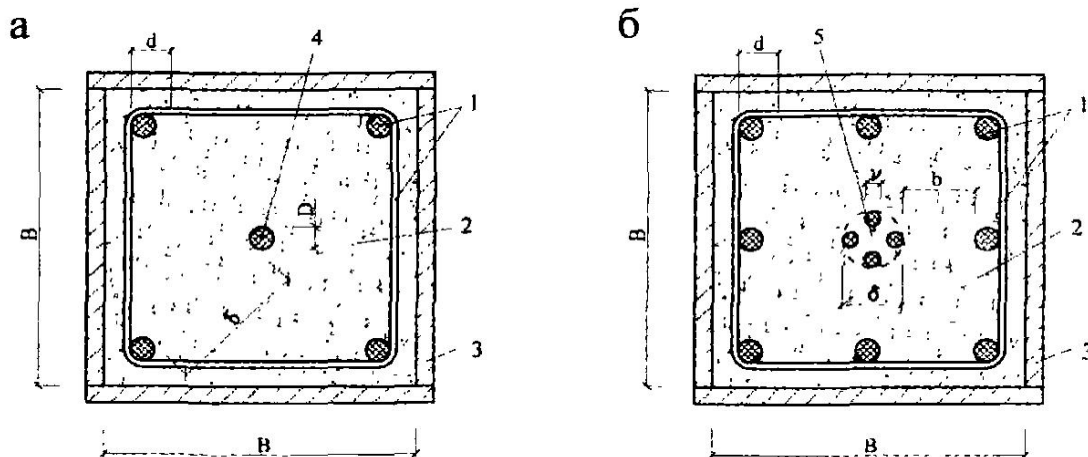


Рис. 2.4. Схема размещения струнных электродов при прогреве конструкций квадратного сечения.

а - С четырьмя арматурными стержнями в углах и одним струнным электродом; б - С часто расположенными арматурными стержнями и пучком струнных электродов;

B - наименьший размер конструкции; b - расстояние между струнными электродами и рабочей арматуры; d - диаметр рабочей арматуры; D - диаметр струнного электрода; δ - диаметр группы струнных электродов; ν - диаметр одного струнного электрода в пучке.

1 - арматура; 2 - бетон; 3 - опалубка; 4 - струнный электрод; 5 - группа струнных электродов.

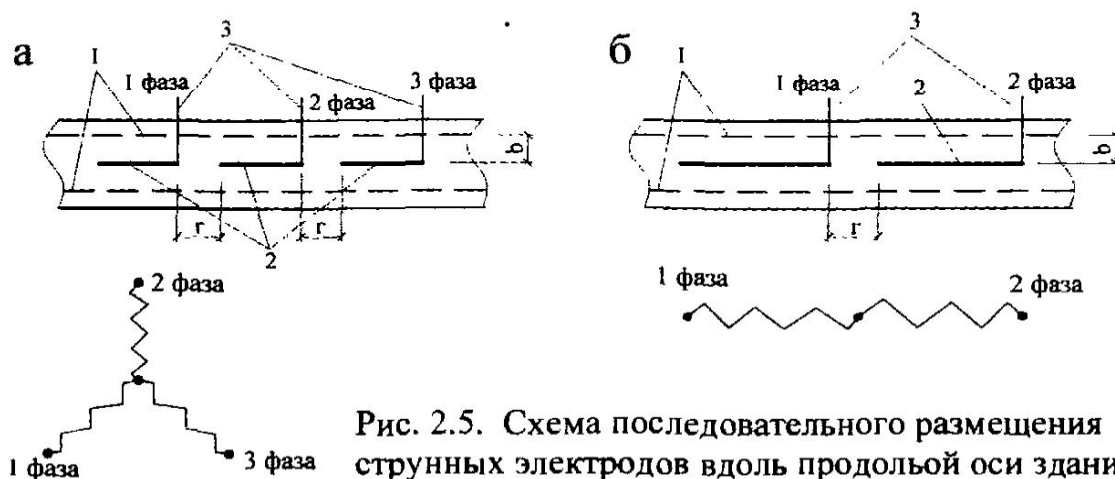


Рис. 2.5. Схема последовательного размещения струнных электродов вдоль продольной оси здания

а - три струны; б - две струны;

1 - арматура; 2 - струнные электроды; 3 - выводы для подведения напряжения к струнам; b - расстояние между струнными электродами и рабочей арматурой; r - расстояние между струнными электродами.

Таблица 2.3

Классификация электродов

Наименование	Описание	Время установки и подсоединения	Материал, характерные размеры, мм
Пластинчатые	Сплошные пластины, устанавливаемые на деревянную опалубку, целиком закрывающие противоположные плоскости по меньшей стороне (толщине) конструкции.	До бетонирования; подсоединенные до или после бетонирования.	Кровельная сталь либо "высечка" толщиной от 1мм.
Полосовые (ленточные)	Полосы, закрепленные на некотором расстоянии одна от другой на элементах опалубки или накладных щитах.	Закрепленные на опалубке – до бетонирования; Закрепленные на накладных щитах – после бетонирования.	Кровельная сталь, листовая сталь. Ширина электродов 20-50мм.
Стержневые	Стержни, устанавливаемые (погружаемые) в бетон.	После бетонирования.	Круглая сталь диаметром 6-12мм.
Струнные	Струны, закрепленные вдоль оси длинномерных конструкций, изолированные от арматуры.	До бетонирования; Подсоединение после бетонирования.	Круглая сталь диаметром 6-12мм.
Напыленные	Напыляемые на опалубку.	До бетонирования напыленные на опалубку и подсоединенные до или после бетонирования.	Напыляются цинком на деревянную, бетонную или пластмассовую опалубку в виде лент, толщиной 50-100 микрон, шириной 30-50мм.

Примечание.

1. На электроды, подсоединенные к питающей сети до бетонирования, напряжение подается только после завершения бетонирования, со строгим соблюдением правил техники безопасности, в т.ч. с обязательным удалением людей из зоны прогрева.
2. В современном строительстве деревянной опалубкой служит водостойкая фанера, досчатая опалубка применяется и в основном для получения поверхности бетона с текстурой дерева.

Полосовые электроды, применяемые вместо пластинчатых, размещают с двух сторон конструкции и подключают к разным фазам. Применение полосовых электродов позволяет уменьшить потребляемую электрическую мощность без изменения величины напряжения. Как правило, полосовые электроды крепятся к опалубке гвоздями или специальными клеями.

Однако использование полосовых электродов, так же как и пластинчатых, возможно только при толщине конструкции, определяющей расстояние между электродами и длину пути электрического тока, не более 50 см. Сквозной прогрев бетона с использованием пластинчатых и полосовых электродов можно осуществлять только при армировании конструкций отдельными стержнями, сетками или плоскими каркасами, расположенными параллельно электродам.

Для прогрева неармированных или слабо армированных конструкций, следует применять электроды, представляющие собой стальные прутки диаметром 6-12 мм, которые погружают в бетон после его укладки. Стержневые электроды, как правило, остаются в бетоне после окончания прогрева, что вызывает непроизводительный расход металла. Их подключение к сети осуществляется после установки в забетонированную конструкцию, что усложняет производство работ по электропрогреву, увеличивает их трудоемкость и удлиняет время от начала бетонирования до начала прогрева.

Наиболее целесообразно применять стержневые электроды не отдельно, а в виде плоских электродных групп, которые могут обеспечить более высокую степень равномерности температурного поля в бетоне. В этом случае все стержни одной группы подключают к одной фазе сети, а соседние группы к разным фазам (рис.2.1в).

Для прогрева конструкций, длина которых во много раз больше размеров их поперечного сечения (колонны, балки, прогоны и т.д.) применяют струнные электроды – стальные прутки длиной ~ 3,5 м, устанавливаемые в бетоне вдоль оси конструкции. Струнные электроды являются разновидностью стержневых. Как правило, подключение струнных электродов к сети осуществляется по окончании бетонирования.

При электропрогреве армированных конструкций квадратного сечения с часто расположенными по периферии продольными арматурными стержнями, струну подключают к одной фазе, а арматурные стержни – к другой.

При большой длине конструкции вместо одной струны возможна установка двух или трех струн, подключаемых к разным фазам сети.

Если диаметр струны, определенный расчетом, получается более 12-16 мм, в целях получения равномерного электрического и температурного полей и экономии металла, рекомендуется заменить одиночную струну эквивалентным пучком струн меньшего диаметра. Условие эквивалентности определяется экспериментальной формулой:

$$\delta = D^{n-1} \cdot v \quad (1)$$

где δ – диаметр окружности пучка, в см;

D – расчетный диаметр одиночной струны, в см;

n – количество струнных электродов в пучке;

v – диаметр одного струнного электрода пучка, в см.

Использовать в качестве электродов арматуру прогреваемых конструкций следует весьма осторожно во избежание возможного пересушивания приэлектродных и приарматурных слоев бетона, уменьшения в связи с этим сцепления арматуры с бетоном, снижения прочности и несущей способности конструкции. Допускается использование в качестве разноименных электродов плавающих арматурных сеток, не соединенных друг с другом металлическими неизолированными связями.

Оптимальный тип и схему размещения электродов следует выбирать исходя из конфигурации и размеров конструкции, степени армирования, видов и расположения арматурных изделий, количества прогреваемых конструкций и т.п.

Однако при этом следует иметь в виду, что анализ электрических и, соответственно, температурных полей, формирующихся при прогреве бетона с помощью различных типов электродов, показывает, что наиболее равномерные поля имеют место при использовании пластинчатых электродов, применение полосовых электродов несколько снижает равномерность полей. Последовательно уменьшается равномерность электрических и температурных полей при использовании стержневых и струнных электродов.

Во избежание местного перегрева и недопустимого увеличения электрической мощности необходимо соблюдать следующие расстояния между электродами и арматурой:

при $U =$ до 50 В – не менее 5 см;

при $U =$ до 80 В – не менее 7 см;

при $U =$ до 120 В – не менее 12 см.

§ 2-4. Параметры электропрогрева бетона.

При проектировании и осуществлении электропрогрева бетона назначают технологические и рассчитывают электрические параметры.

К технологическим параметрам относятся: скорость разогрева, температура изотермического прогрева, продолжительность прогрева, прочность бетона к окончанию тепловой обработки, скорость остывания.

К электрическим параметрам относятся: напряжение в сети, сила тока, выделяемая электрическая мощность.

Технологические параметры. Скорость разогрева должна приниматься с таким расчетом, чтобы исключить быстрое расширение бетона, способствующее нарушению его структуры и ухудшению свойств.

Так, при разогреве находящиеся в бетоне вода и паро-воздушная смесь стремятся увеличиться в объеме в соответствии с коэффициентами температурного расширения. Однако каркас из твердых компонентов препятствует свободному расширению воды и паро-воздушной смеси, вследствие чего в бетоне образуется повышенное давление, под действием которого неокрепшая еще структура бетона разрыхляется, он затвердевает в таком расширившемся состоянии, в результате чего снижается его прочность, увеличивается пористость и проницаемость, уменьшаются морозостойкость и долговечность.

Действующий СНиП 3.03.01-87 «Несущие и ограждающие конструкции» устанавливает скорость подъема температуры:

- для конструкций с модулем поверхности до 4 м^{-1} не более $5^{\circ}\text{C}/\text{ч}$;
- для конструкций с модулем поверхности от 5 до 10 м^{-1} не более $10^{\circ}\text{C}/\text{ч}$;
- для конструкций с модулем поверхности более 10 м^{-1} не более $15^{\circ}\text{C}/\text{ч}$;
- для стыков – не более $20^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

Температура изотермического прогрева не должна превышать для бетонов: на портландцементе – 80°C , на шлакопортландцементе – 90°C .

Во многих случаях прогрев бетона на портландцементе (особенно высокоалюминатном) при температурах выше 50°C вызывает снижение прочности по сравнению с прочностью бетона, твердеющего в нормальных температурных условиях.

Малоактивные (с повышенным содержанием C_2S) и смешанные портландцементы при благоприятном влажностном режиме не дают снижения прочности при прогреве, а наоборот, повышают ее по сравнению с марочной.

Ускорение гидратации портландцемента без тонкомолотых добавок и без увеличения добавки гипса при повышенных температурах приводит к быстрому образованию кристаллических сростков и плотной оболочки новообразований вокруг зерен цемента. Эти оболочки мешают дальнейшему проникновению воды и продолжению гидратации минералов цементного клинкера.

При введении же активных кремнеземистых добавок или доменных шлаков выделение свободной гидроокиси кальция благоприятствует гидратации цемента и вовлекает в процесс твердения добавки.

Портландцементный камень, подвергнутый тепловой обработке, получается более хрупким и менее плотным, что и ухудшает его свойства.

Максимальная температура электротермообработки железобетонных конструкций с предварительно-напряженной арматурой должна назначаться с учетом возможных потерь предварительного напряжения арматуры. Потери напряжения прямо пропорциональны разности температур прогреваемого бетона и арматуры t_6 и упоров t_y , воспринимающих усилия натяжения арматуры и могут быть определены по формуле:

$$\sigma = 20 \cdot (t_6 - t_y) \quad (2)$$

Если в прогреваемой конструкции предварительное напряжение арматуры из твердых сталей меньше 0,65 нормативного расчетного сопротивления, а из мягких сталей – менее 0,9, то при натяжении арматуры рекомендуется компенсировать возникающие при прогреве потери напряжения дополнительным натяжением, величину которого следует определять по приведенной формуле.

При невозможности производства дополнительного натяжения арматуры максимальную температуру прогрева следует принимать не выше 80°C , а потери напряжения арматуры при прогреве следует учитывать при расчете конструкции.

Электротермообработка монолитных каркасных и рамных конструкций с жесткой заделкой узловых сопряжений во избежание возникновения больших температурных напряжений и появления трещин должна производиться, как правило, при температуре изотермического прогрева бетона не выше 40°C .

Максимальная температура изотермического прогрева бетона в конструкциях с $M_p < 3 \text{ м}^{-1}$ (блоки гидротехнических сооружений, фундаменты под оборудование и др.) назначается с учетом формирования такого температурного поля, которое обеспечивало бы благоприятное термонапряженное состояние конструкции в процессе всего твердения. Это достигается любыми средствами, обеспечивающими поддержание по сечению массива одинаковой температуры.

Поддержание температуры бетона в процессе прогрева на заданном уровне осуществляется одним из следующих способов:

- а) изменением величины напряжения, подводимого к электродам;
- б) периодическим включением и отключением напряжения;
- в) отключением и включением отдельных электродов или групп электродов.

Для обеспечения равной прочности бетона во всех частях прогреваемой конструкции и снижения температурных напряжений необходимо стремиться к уменьшению температурных перепадов по объему конструкции в процессе всей тепловой обработки. Для этой цели необходимо предусматривать теплоизоляцию прогреваемых конструкций, особенно отдельных их частей, подвергаемых быстрому охлаждению.

Продолжительность изотермического прогрева устанавливается в зависимости от величины прочности, которую должен приобрести бетон к окончанию прогрева. В этом случае нарастание прочности за время остывания бетона до температуры окружающей среды, как правило, не учитывается.

Электропрогрев бетона целесообразно осуществлять при максимально допустимой температуре до приобретения 50-70% прочности. Для получения к окончанию прогрева бетоном более 70% прочности рекомендуется использовать быстротвердеющие или высокоактивные цементы, добавки-ускорители твердения, жесткие бетонные смеси. При необходимости получения к окончанию термообработки 100% прочности следует повысить марку бетона на одну ступень.

После окончания изотермического прогрева скорость остывания бетона не должна превышать:

- для конструкций с модулем поверхности более $10 \text{ м}^{-1} - 10^0 \text{С/ч}$;
- для конструкций с модулем поверхности от 5 до $10 \text{ м}^{-1} - 5^0 \text{С/ч}$.

Для конструкций с меньшим модулем поверхности скорость остывания устанавливается расчетом, исходя из условия исключения температурных деформаций бетона.

Для обеспечения одинаковых условий остывания различных по толщине частей конструкции тонкие элементы, углы и выступающие части, остывающие быстрее основной конструкции, должны дополнительно утепляться.

Размеры участка с усиленным утеплением должны предусматриваться проектом производства работ.

С целью исключения температурных деформаций, распалубка монолитных конструкций допускается при разности температур между наружным слоем бетона и окружающей средой не более 20^0С .

К электрическим параметрам относятся: потребная электрическая мощность, выделяемая электрическая мощность, напряжение в сети, сила тока в сети.

Электрические параметры. При электродном прогреве количество тепла, выделяемое в бетоне в результате прохождения электрического тока, определяется по формуле:

$$Q = 3,6 \cdot I^2 \cdot R \cdot T = 3,6 \cdot U \cdot I \cdot T = 3,6 \cdot P \cdot T, \quad (3)$$

где Q – количество выделяемого тепла, Дж;

I – сила тока, А;

U – напряжение, В;

R – электрическое сопротивление, Ом;

T – продолжительность прохождения электрического тока, час;

P – выделяемая электрическая мощность, Вт.

Определение требуемой электрической мощности.

Тепло, выделяющееся в результате преобразования электрической энергии, расходуется на прогрев до заданной температуры бетона и размещаемой в нем арматуры, частично на нагрев опалубки, возмещение теплопотерь в окружающую среду. Электрическая мощность, требуемая при электропрогреве, зависит от скорости и температуры разогрева бетона, начальной температуры бетона, модуля поверхности конструкции, температуры окружающей среды, теплосопротивления опалубки, продолжительности активного прогрева (см. Приложение № 1).

При проектировании электрических параметров электропрогрева целесообразно определять требуемую удельную электрическую мощность, т.е. мощность, приходящуюся на 1 м^3 бетона.

Удельная электрическая мощность, требуемая на отдельных этапах электропрогрева для выдерживания заданного режима, определяется по следующим формулам:

на период подъема температуры

$$P_1 + P_2 + P_3 = \frac{C_b \cdot \gamma_b \cdot \rho}{3600} + \frac{C_{on} \cdot \gamma_{on} \cdot \delta_{on} \cdot M \cdot \rho}{3600 \cdot 2} + \frac{K \cdot M_n \cdot (t_b + t_u - 2t_a)}{1000 \cdot 2} \quad (4)$$

на период изотермического прогрева

$$P_4 = \frac{K \cdot M \cdot (t_u - t_a)}{1000} - 0,8 \quad \text{кВт/м}^3 \quad (5)$$

где P_1 – мощность, необходимая для разогрева бетона, кВт/м³;

P_2 – мощность, необходимая для разогрева опалубочной системы, кВт/м³;

P_3 – мощность, необходимая для восполнения теплопотерь в окружающую среду в процессе разогрева бетона, кВт/м³;

P_4 – мощность, необходимая для восполнения теплопотерь в окружающую среду в процессе изотермического прогрева бетона, кВт/м³;

0,8 – мощность, эквивалентная теплу, выделяющемуся за время прогрева вследствие экзотермии цемента, кВт/м³;

C_b – удельная теплоемкость бетона, кДж/(кг·град) (для обычных бетонов $C_b = 1,04$ кДж/(кг·град));

γ_b – объемная масса бетона, кг/м³;

p – скорость подъема температуры бетона, град/ч;
 $C_{оп}$ – теплоемкость материала опалубки, утеплителя и др. частей опалубочной системы, кДж/(кг·град);
 $\gamma_{оп}$ – объемная масса материала опалубки, утеплителя и др. частей опалубочной системы, кг/м³;
 $\delta_{оп}$ – средняя толщина опалубки, утеплителя и др. частей опалубочной системы, м;
 K – общий коэффициент теплопередачи опалубочной системы, Вт/(м²·град);
 M_n – модуль поверхности конструкции, м⁻¹;
 t_6 – температура бетона перед началом прогрева, град;
 t_u – температура изотермического прогрева бетона, град;
 t_b – температура окружающей среды, град.

Расчет выделяемой электрической мощности

При электропрогреве бетона с помощью пластинчатых электродов выделяемая удельная электрическая мощность равна:

$$P = \frac{U^2 \cdot 10^{-3}}{\rho \cdot b^2} \text{ кВт/м}^3,$$

где P – выделяемая электрическая мощность, кВт/м³;
 U – напряжение в цепи, В;
 ρ – расчетное удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·м;
 b – расстояние между электродами, м.

Выделяемая удельная электрическая мощность при прогреве бетона полосовыми электродами, расположенными с одной стороны конструкции, определяется по формуле:

$$P = \frac{U^2 \cdot 10^{-3}}{\rho \cdot B^2 \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot b}{\pi \cdot B} \cdot \ln \frac{b}{2a}\right)} \text{ кВт/м}^3,$$

где B – толщина конструкции (расстояние между разноименными электродами), м;
 a – ширина полосового электрода, м;
 α – коэффициент при электропрогреве, равный 3/2 при трехфазном токе и 2 – при однофазном токе.

Выделяемую электрическую мощность при сквозном электропрогреве бетона полосовыми электродами с двухсторонним размещением можно определить, умножая полученную величину на коэффициент:

$$Z = \frac{1}{1 + \frac{\alpha \cdot b}{\pi \cdot B} \cdot \ln \frac{b}{2a}}$$

Значения коэффициента Z при различных величинах B , a и b определяются по табл. 2.4.

Таблица 2.4

Значения коэффициента z при сквозном прогреве бетона с двухсторонним расположением полосовых электродов

Расстояние между электродами, см	Значение коэффициента z при отношении $\frac{B}{2a}$							
	0,3		0,4		0,6		0	
	Ширина электрода, см							
	2	5	2	5	2	5	2	5
10	0,944	-	0,885	-	0,754	0,952	-	0,85
	0,925	-	0,847	-	0,704	0,934	-	0,806
20	0,862	0,971	-	0,916	-	0,8	-	0,695
	0,825	0,971	-	0,841	-	0,752	-	0,63
30	-	0,925	-	0,854	-	0,73	-	-
	-	0,9	-	0,818	-	0,671	-	-
40	-	0,884	-	-	-	-	-	-
	-	0,854	-	-	-	-	-	-
60	-	0,846	-	-	-	-	-	-
	-	0,806	-	-	-	-	-	-

Примечание. В числителе приведены величины z для трехфазного тока, в знаменателе – для однофазного тока.

При расположении стержневых электродов в шахматном порядке выделяемая удельная электрическая мощность равна:

$$P = \frac{3,14 \cdot U^2 \cdot 10^{-3}}{\rho \cdot b^2 \cdot (\alpha \cdot \ln \frac{b}{\pi \cdot d} + \pi)} \quad \text{кВт/м}^3,$$

где d – диаметр стержневого электрода, м;

b – расстояние между разноименными электродами, м.

При прогреве бетона плоскими группами стержневых электродов выделяемая удельная электрическая мощность определяется по формуле:

$$P = \frac{3,14 \cdot U^2 \cdot 10^{-3}}{\rho \cdot b \cdot h \cdot (\alpha \cdot \ln \frac{h}{\pi \cdot d} + \pi \frac{b}{h})} \quad \text{кВт/м}^3,$$

где b – расстояние между плоскими электродными группами, м;

h – расстояние между электродами в группе, м.

При электропрогреве монолитных железобетонных конструкций квадратного или близкого к нему сечения, армированных продольными стержнями, часто расположенными по периферии (рис.2.4) или изготавливаемых в форме с металлическими бортами или в деревянной опалубке, внутренние поверхности которой обиты кровельной сталью, струну или группу струн устанавливают по оси конструкции и подключают к одной фазе, борта формы – к другой фазе сети. В отдельных исключительных случаях при необходимости в качестве другого электрода, может быть использована рабочая арматура. В этом случае выделяемая удельная электрическая мощность определяется по формуле:

$$P = \frac{6,28U^2 \cdot 10^{-3}}{\rho_{\text{расч}} \cdot B^2 \cdot \ln \frac{b}{d^2}}, \quad \text{кВт/м}^3$$

Если конструкции прямоугольного сечения армированы четырьмя продольными стержнями, расположенными в углах ее сечения (рис.2.4), выделяемая удельная электрическая мощность определяется по формуле:

$$P = \frac{6,28U^2 \cdot 10^{-3}}{\rho_{\text{расч}} \cdot B^2 \cdot \ln \frac{2b}{d_2} \sqrt{\frac{b}{2d_3}}}, \quad \text{кВт/м}^3,$$

где b - расстояние между осями струны и арматурных стержней, м.

§ 2-5. Пример расчета параметров электропрогрева бетона

Расчет параметров электродного прогрева бетона осуществляется в следующей последовательности:

1. Определяют тип электродов и их размеры.
2. Назначают технологические параметры:
 - а) температуру прогрева;
 - б) скорость разогрева;
 - в) продолжительность изотермического прогрева;
 - г) скорость остывания.
3. Рассчитывают электрические параметры:
 - а) определяют удельное электрическое сопротивление бетона;
 - б) определяют требуемую электрическую мощность на период разогрева;
 - в) определяют требуемую электрическую мощность на период изотермического прогрева;
 - г) определяют требуемую электрическую мощность на период остывания (при регулируемом остывании);
 - д) определяют величину напряжения электрического тока на период разогрева;
 - е) определяют величину напряжения электрического тока на период изотермического прогрева;
 - ж) определяют максимальную силу тока;
 - з) определяют сечение подводящих проводов.
4. Проверяют соответствие выделяемой электрической мощности требуемой.

Пример 1. Необходимо определить параметры электродного прогрева бетона стены размером $6 \times 2,5 \times 0,3$ м, армированной двумя параллельными сетками. Бетон тяжелый марки 300 (класс В 22,5) на портландцементе марки 400.

К моменту окончания изотермического прогрева бетон должен приобрести прочность не менее 70% марочной.

Температура окружающей среды на основании статистических данных составляет -10°C .

В качестве опалубки используем комбинированную конструкцию с общим коэффициентом теплопередачи $K=3,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Принимаем температуру бетона в начале прогрева (после укладки в опалубку и уплотнения) ($t_{б.н.}$) равную $+5^{\circ}\text{C}$.

Исходя из габаритов и размеров конструкции, степени армирования и вида арматурных изделий, прогрев целесообразно осуществлять пластинчатыми электродами, размещаемыми на больших сторонах стены.

На основании заданных вида и марки цемента и в соответствии с действующими нормативными документами прогрев следует осуществлять при температуре 80°C .

Определяем модуль поверхности конструкции:

$$F_1 = 6\text{м} \cdot 2,5\text{м} \cdot 2 = 30\text{м}^2$$

$$F_2 = 6\text{м} \cdot 0,3\text{м} \cdot 2 = 3,6\text{м}^2$$

$$F_3 = 2,5\text{м} \cdot 0,3\text{м} \cdot 2 = 1,5\text{м}^2$$

$$\Sigma F = 30\text{м}^2 + 3,6\text{м}^2 + 1,5\text{м}^2 = 35,1\text{м}^2$$

$$V = 6\text{м} \cdot 2,5\text{м} \cdot 0,3\text{м} = 4,5\text{м}^3$$

$$M_{п} = \Sigma F / V = 35,1\text{м}^2 / 4,5\text{м}^3 = 7,8\text{м}^{-1}$$

В соответствии с действующими нормативами бетон в конструкциях с $M_{п} = 7,8\text{м}^{-1}$ следует разогревать со скоростью не более $10^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

По графикам нарастания прочности бетона при различных температурах определяем продолжительность прогрева при температуре 80°C до приобретения заданной прочности – она составляет 12 часов.

Скорость остывания бетона конструкции с $M_{п} = 7,8\text{м}^{-1}$ по окончании прогрева должно составлять не более $5^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

Принимаем опалубку с общим коэффициентом теплопередачи (K) равным $3,6\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ при действии ветра со скоростью $5\text{ м}/\text{сек}$.

Определяем электрическую мощность, необходимую для разогрева 1м^3 бетона стены до 80°C :

$$P_p = (C_b \cdot \gamma_b \cdot \rho) / 3600 + [K \cdot M_{п} \cdot (t_{б.н.} + t_{н} - 2t_{в.})] / 1000 \cdot 2 = 1,04 \cdot 2400 \cdot 10 / 3600 + [3,6 \cdot 7,8 \cdot (5 + 80 - (-2 \cdot 10))] / 1000 \cdot 2 = 6,9 + 1,5 = 8,4\text{ кВт}/\text{м}^3$$

Расход тепла на отопление опалубки и арматуры не учитываем, т.к. они "отнимут" тепло у уложенного бетона и это отразится в начальной температуре бетона ($t_{б.н.}$).

Определяем мощность, необходимую для поддержания заданной температуры (80°C) в процессе изотермического прогрева.

$$P_{п} = K \cdot M_{п} \cdot (t_{п} - t_{н.в.}) / 1000 = 3,6 \cdot 7,8 [80 - (-10)] / 1000 = 2,5\text{ кВт}/\text{м}^3$$

Учитывая, что для производственных целей используется трехфазный ток, для исключения перекося фаз, стену разбиваем на 3 части, каждая из которых будет прогреваться отдельной парой плоских электродов площадью 5м^2 (площадь прогреваемой стены $2\text{м} \cdot 2,5\text{м}$).

Общий объем одновременного разогреваемого (и прогреваемого) бетона составляет $4,5\text{ м}^3$ (объем стены). Поэтому :

$$P_p = 8,4 \text{ кВт/м}^3 \cdot 4,5 \text{ м}^3 = 37,8 \text{ кВт}$$

$$P_n = 2,5 \text{ кВт/м}^3 \cdot 4,5 \text{ м}^3 = 11,25 \text{ кВт}$$

Выбор трансформатора осуществляется, исходя из максимальной потребной мощности ~ 38 кВт с учетом объема одновременно прогреваемого бетона.

Определение параметров тока (напряжение и силу тока) осуществляется с учетом разбивки стены на три самостоятельно (хотя и одновременно) прогреваемые части с объемом $1,5 \text{ м}^3$ каждая (когда это возможно).

Для расчета параметров тока необходимо знать расчетное удельное электрическое сопротивление бетона ($\rho_{\text{расч}}$).

В построечной лаборатории опытным путем легко определяется начальное и минимальное удельное электрическое сопротивление бетона (соответственно $\rho_{\text{нач}}$ и $\rho_{\text{мин}}$) по методике, изложенной в "Руководстве":

$$\rho_{\text{расч}} = (\rho_{\text{нач}} + \rho_{\text{мин}}) / 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

В нашем примере примем $\rho_{\text{расч}}$ равное $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Определяем электрическое сопротивление бетона (R):

$$R = \rho_{\text{расч}} \cdot v/S = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 0,3 \text{ м} / 5\text{ м}^2 = 0,6 \text{ Ом} ,$$

где v – расстояние между электродами (толщина стены), м;

S – площадь электродов, м^2 .

Определяем требуемые электрические параметры на период разогрева:

Напряжение в сети составит:

$$U = \sqrt{P \cdot R}$$

$$P = 8,4 \text{ кВт/м}^3 \cdot 1,5 \text{ м}^3 = 12,6 \text{ кВт} = 12600 \text{ Вт}$$

$$U = \sqrt{12600 \text{ Вт} \cdot 0,6 \text{ Ом}} = 87 \text{ В}$$

Сила тока, подводимая к каждой паре электродов, составит:

$$J = U/R = 87 \text{ В} / 0,6 \text{ Ом} = 145 \text{ А}$$

Определяем требуемые электрические параметры на период изотермического прогрева:

$$P_n = 2,5 \text{ кВт/м}^3 \cdot 1,5 \text{ м}^3 = 3,75 \text{ кВт} > 3750 \text{ Вт}$$

$$U_n = \sqrt{3750 \text{ Вт} \cdot 0,6 \text{ Ом}} = 47,5 \text{ В}$$

$$I_n = \frac{47,5 \text{ В}}{0,6 \text{ Ом}} = 80 \text{ А}$$

Используя вышеприведенные методики, определяем возможность выделения требуемой электрической мощности по рассчитанным электрическим параметрам:

$$P_p = \frac{U^2 \cdot 10^{-3}}{v^2 \cdot \rho_{\text{расч}}} = \frac{(87 \text{ В})^2 \cdot 10^{-3}}{(0,3 \text{ м})^2 \cdot 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}} = 8,41 \text{ кВт/м}^3$$

$$P_{и} = \frac{(47,5 \text{ В})^2 \cdot 10^{-3}}{(0,3 \text{ м})^2 \cdot 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}} = 2,5 \text{ кВт/м}^3$$

Выделяемые электрические мощности соответствует мощности, необходимой для разогрева и изотермического прогрева бетона.

Затем, с учетом определенных электрических параметров, подбираются технические средства (трансформатор, подводящие провода или кабели) для осуществления электропрогрева бетона стены.

Следует подчеркнуть, что электрические мощности и необходимые трансформаторы назначаются и выбираются до начала прогрева.

При одновременном прогреве нескольких типов конструкций необходимо электрические параметры определять отдельно для каждого типа и объема конструкций, используя вышеприведенную методику.

Для определения общей потребности электрической мощности следует сложить мощности, потребные на прогрев всех конструкций.

С целью рационального использования электрических мощностей целесообразно разработать график электропрогрева конструкций, на котором указать последовательность включения в прогрев забетонированных участков и периоды прогрева бетона на каждом участке.

Пример 2. Необходимо определить параметры электродного прогрева бетона стены в пределах захватки.

Длина стены 56 м. Высота стены 3 м. Толщина стены 0,3 м.

Армирование параллельными сетками.

Бетон марки 300 (класса В 22,5) на портландцементе марки 400.

В качестве опалубки используется комбинированная конструкция с общим коэффициентом теплопередачи $K = 3,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$.

Принимаем температуру бетона в начале прогрева равную $+5^\circ\text{С}$.

Температуру изотермического прогрева принимаем равной 80°С , а скорость разогрева – 10°С/ч .

Температура окружающей среды равна -10°С .

Расчет ведем в соответствии с вышеизложенной методикой.

Модуль поверхности конструкции равен $7,5 \text{ м}^2$.

Электрическая мощность, необходимая для разогрева 1 м^3 бетона, составит:

$$P_p = \frac{1,04 \cdot 2400 \cdot 10}{3600} + \frac{3,6 \cdot 7,5 \cdot [5 + 80 - 2 \cdot (-10)]}{1000 \cdot 2} = 6,9 + 1,4 = 8,3 \text{ кВт/м}^3$$

Определяем электрическую мощность, необходимую для поддержания заданной температуры в период изотермического прогрева:

$$P_{и} = \frac{3,6 \cdot 7,5 \cdot [80 - (-10)]}{1000} = 2,4 \text{ кВт/м}^3$$

Общий объем одновременно прогреваемого объема бетона составляет 50 м^3 .

Поэтому $P_p = 8,3 \text{ кВт/м}^3 \cdot 50 \text{ м}^3 = 415 \text{ кВт}$

$$P_{и} = 1,4 \text{ кВт/м}^3 \cdot 50 \text{ м}^3 = 70 \text{ кВт}$$

Выбор трансформаторов для электропрогрева производим, находя из максимальной потребной мощности 415 кВт.

Для обеспечения приемлемых токовых нагрузок разбиваем стену на участки длиной 2 м, площадью 6 м² и объемом 1,8 м³. Исходя из этого, определяем напряжение и силу тока в цепи.

Определяем электрическое сопротивление бетона, принимая $\rho_{\text{расчет}}$ равным 10 Ом·м:

$$R = \frac{10 \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 0,3 \text{ м}}{6 \text{ м}^2} = 0,5 \text{ Ом}$$

Определяем электрические параметры на период разогрева

$$P_p = 8,3 \text{ кВт/м}^3 \cdot 1,8 \text{ м}^3 = 14,94 \text{ кВт} = 14940 \text{ Вт}$$

$$U_p = \sqrt{P_p \cdot R} = \sqrt{14940 \text{ Вт} \cdot 0,5 \text{ Ом}} = 86,5 \text{ В}$$

$$I_p = \frac{U_p}{R} = \frac{86,5 \text{ В}}{0,5 \text{ Ом}} = 173 \text{ А}$$

Определяем электрические параметры на период изотермического прогрева

$$P_{\text{и}} = 2,4 \text{ кВт/м}^3 \cdot 1,8 \text{ м}^3 = 4,32 \text{ кВт} = 4320 \text{ Вт}$$

$$U_{\text{и}} = \sqrt{4320 \text{ Вт} \cdot 0,5 \text{ Ом}} = 46,5 \text{ В}$$

$$I_{\text{и}} = \frac{46,5 \text{ В}}{0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}} = 93 \text{ А}$$

По полученным токовым параметрам определяем величину выделяемой электрической мощности

$$P_p = \frac{(86,5 \text{ В})^2 \cdot 10^{-3}}{(0,3 \text{ м})^2 \cdot 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}} = 8,31 \text{ кВт/м}^3$$

$$P_{\text{и}} = \frac{(46,5 \text{ В})^2 \cdot 10^{-3}}{(0,3 \text{ м})^2 \cdot 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}} = 2,4 \text{ кВт/м}^3$$

С учетом экзотермического тепла выделяемые мощности обеспечивают выдерживание заданных технологических параметров электропрогрева бетона

§ 2-6. Электропрогрев бетонов с противоморозными добавками.

Электропрогрев бетона с противоморозными добавками рекомендуется производить при необходимости получения распалубочной прочности в короткие сроки, а также во многих случаях, когда бетонирование и выдерживание бетона производится при низких температурах воздуха.

Электропрогрев бетона с противоморозными добавками может применяться также в тех случаях, когда не представляется возможным применить электропрогрев обычного бетона из-за опасности его замораживания до установки и подключения всех электродов на захватке (например, при длительном транспортировании смеси, укладке ее небольшими объемами и т.п.).

Введение в бетонную смесь противоморозных добавок приводит к понижению температуры ее замерзания и уменьшению электрического сопротивле-

ния, в том числе и при отрицательных температурах. Это позволяет начинать электропрогрев бетона, остывшего до температуры ниже 0⁰С.

При соблюдении всех технологических требований и оптимальных режимах прочность при сжатии по окончании прогрева бетона с добавками составляет 75-90%, а через 28 суток последующего выдерживания на морозе и 28-суточного нормально-влажного хранения – 100-120% от марочной прочности.

При необходимости получения меньшей величины прочности бетона по окончании прогрева (например, критической) продолжительность изотермического прогрева может быть существенно снижена (до 4 ч), что дает возможность экономить электроэнергию, повышать оборачиваемость опалубки и электрооборудования.

При этом электропрогрев не приводит к снижению основных строительно-технических свойств бетона (прочность при осевом растяжении, призмочная прочность, сцепление с арматурой, морозостойкость и др.) по сравнению с бетоном, твердеющим без прогрева.

В качестве противоморозных добавок в бетоны, подвергаемые электропрогреву, должны применяться только проверенные и сертифицированные. Из отечественных противоморозных добавок можно применять нитрит натрия, формиат натрия и комплексные (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Количество противоморозных добавок для бетона, подвергаемого электропрогреву

Температура остывания бетона до электропрогрева, °С		Количество добавок в расчете на сухое вещество, % от массы цемента			
От	До	НН, формиат натрия	ННХК	ХК+ХН *)	ХК+НН
0	-5	4	4	0+2	1+1,5
-6	-10	6	7	0+3	1,5+2
-11	-15	8	10	1+3	3+3,5
-16	-20	10	-	1,5+3,5	4,5+5,5

Примечание. Добавку ХК+ХН допускается применять в неармированные конструкции

При необходимости в состав бетонных смесей допускается вводить добавки, предотвращающие их ускоренное загустение или добавки для повышения морозостойкости бетона (воздухововлекающие).

Применение в бетонах, подвергаемых электропрогреву, противоморозных добавок, в состав которых входит мочевина, не допускается из-за разложения мочевины при температуре выше 40⁰С.

Применение поташа в качестве противоморозной добавки не разрешается вследствие того, что прогретые бетоны с этой добавкой имеют значительный (более 30%) недобор прочности по сравнению с непрогретым бетоном, характеризуются пониженной морозостойкостью и водонепроницаемостью.

Для бетонов с противоморозными добавками, подвергаемых электропрогреву, наиболее эффективно применение портландцементов с содержанием в клинкере C_3A не более 6% во избежание недобора прочности.

До начала бетонных работ необходимо изготовить в лабораторных условиях образцы из бетона подобранного состава, содержащего противоморозную добавку. Образцы после охлаждения до отрицательной температуры должны быть подвергнуты электропрогреву с последующим определением их прочности и сравнением ее с прочностью эталона.

Количество противоморозных добавок следует назначать по таблице 2.5 в зависимости от предполагаемой температуры остывания уложенного бетона до начала электропрогрева.

Количество вводимой противоморозной добавки должно обеспечивать при остывании бетонной смеси до ожидаемой температуры величину ее удельного электрического сопротивления не более $3500 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Эта величина позволяет рационально разместить электроды и осуществить электропрогрев бетона с использованием пониженного напряжения (до 127 В) в соответствии с требованиями техники безопасности.

Указанные в таблице 2.5 количества противоморозных добавок, как правило, обеспечивают необходимую величину удельного электрического сопротивления остывшего бетона. Однако до начала бетонных работ рекомендуется определить фактическую величину удельного электрического сопротивления бетона с добавкой подобранного состава при остывании бетона до требуемой температуры.

Для уменьшения потерь тепла бетон следует укладывать в опалубку, имеющую общий коэффициент теплопередачи (K) не более $3,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Расстояние между электродами следует определять исходя из величины начального электрического сопротивления $3500 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ или фактической его величины. При определении расстояния между электродами начальную величину напряжения на электродах рекомендуется принимать в пределах 103-121 В, а если фактическая величина удельного электрического сопротивления меньше $3500 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – в пределах 85-103 В. По мере подъема температуры бетона его электрическое сопротивление снижается и напряжение на электродах нужно соответственно уменьшать. Ориентировочно расстояние между стержневыми электродами можно применять равным 150-200 мм.

Электропрогрев должен быть начат не позже охлаждения бетона до температуры, принятой для назначенного количества добавки, на наиболее быстро остывающем участке во избежание чрезмерного возрастания удельного электрического сопротивления уложенного бетона (при приближении к критической температуре).

Скорость подъема температуры бетона, температуру изотермического прогрева и его продолжительность, скорость остывания конструкций, а также температурные условия распалубки следует принимать как для бетона без добавок. Однако необходимо учитывать, что в процессе прогрева бетоны с добавками твердеют несколько интенсивнее, чем без них. В связи с этим продолжительность изотермического прогрева может быть принята на 20-25% меньше, чем бетона без добавок.

Для регулирования напряжения на электродах необходимо применять понижающие трансформаторы для электропрогрева бетона. Поскольку диапазон изменения удельного электрического сопротивления бетонов с противоморозными добавками от его начального значения до минимального может быть значительно бóльшим, чем для бетонов без добавок, то для электропрогрева бетонов с добавками наиболее целесообразно применять понижающие трансформаторы с бесступенчатым регулированием вторичного напряжения (типа АОСУ, АОМК, АТМК). При использовании ступенчатых трансформаторов в ряде случаев может оказаться необходимым для выдерживания заданного температурного режима осуществлять периодическое включение и отключение напряжения на электродах в течение нескольких часов либо производить включение и отключение отдельных групп электродов.

§ 2-7. Производство работ при электропрогреве бетона.

Прогрев каждой конструкции можно осуществлять с использованием разных типов электродов и схем их размещения. Оптимальный тип, схему размещения и подключения электродов следует выбирать исходя из конфигурации и размеров конструкции, расположения арматуры, количества одновременно прогреваемых конструкций, местных условий производства и др.

Во избежании местного перегрева и недопустимого увеличения выделяемой в бетоне мощности (более чем на 10-15% по сравнению с расчетной) необходимо в период подъема температуры принимать напряженность поля не более 10-12 В/см. Указанные ограничения не относятся к импульсному прогреву.

Отступления допускаются только после экспериментального подтверждения отсутствия чрезмерных перепадов температур в бетоне и при недопустимости увеличения электрической мощности.

Применение сквозного электродного прогрева наиболее эффективно для конструкций простой конфигурации, неармированных, мало армированных, армированных сетками или плоскими каркасами.

Периферийный прогрев следует применять для термообработки бетона в массивных и средней массивности монолитных конструкциях любой конфигурации (без выступающих частей небольшой толщины).

С помощью напыленных, ленточных или полосовых электродов, закрепляемых на опалубке, рекомендуется прогревать ленточные монолитные фундаменты, подпорные стенки и другие подобные конструкции. При толщине конструкции до 40-60 см осуществляется сквозной прогрев. При большей толщине рекомендуется применять периферийный прогрев по каждой из плоскостей конструкции.

Для монолитной бетонной подготовки, бетонных полов, армированных конструкций, развитых в горизонтальном направлении (днища резервуаров, плоских перекрытий и т.п. толщиной до 20 см), следует использовать односторонний периферийный прогрев с помощью накладных щитов с закрепленными на них электродами. Щиты должны плотно прилегать к поверхности бетона.

При прогреве наклонными щитами монолитных ребристых плит перекрытий вдоль их ребер следует устанавливать дополнительные ленточные или полосовые электроды для периферийного или сквозного прогрева.

Монолитные стены и перегородки также целесообразно прогревать с использованием закрепленных на деревянной опалубке электродов. В зависимости от толщины конструкции и ее армирования следует применять сквозной или периферийный прогрев.

Для монолитных железобетонных колонн постоянного сечения по длине с шириной не более 40 см при небольшой степени армирования отдельными стержнями рекомендуется использовать сквозной электропрогрев с применением закрепленных на опалубке электродов. Колонны большей ширины рекомендуется прогревать по периферии с помощью нашивных электродов.

Колонны и сваи с большой степенью армирования пространственными каркасами целесообразно прогревать с помощью струнных электродов или (при наличии арматуры по всему сечению) путем электрообогрева в греющей опалубке или греющим проводом.

Для конструкций сложной конфигурации и с высокой степенью армирования применение электродного прогрева нецелесообразно.

В проект производства работ по возведению монолитных железобетонных конструкций должны быть включены технологические карты электропрогрева.

Технологическая карта разрабатывается на электропрогрев конструкции или группы одновременно прогреваемых конструкций.

Каждая технологическая карта должна включать в себя: схемы прогреваемых конструкций с указанием: положения арматуры и закладных деталей, типа используемых электродов, мест их размещения и подключения к подводящим напряжением проводам, способов закрепления электродов и их изоляции от арматуры. В технологической карте приводятся также данные о сечении и длине подводящих напряжением проводов и кабелей, схемы размещения температурных скважин, данные о паро- и теплоизоляции неопалубленных поверхностей бетона. В технологической карте даются подробные указания о режиме прогрева с расчетом технологических и электрических параметров электропрогрева, разрабатывается график электропрогрева бетона, на котором указывается последовательность включения участков бетонирования в прогрев и продолжительность каждого периода.

Расчет электрических параметров осуществляется с учетом одновременно прогреваемых конструкций и их объема. При расчете потребных электрических мощностей целесообразно использовать график электропрогрева бетона.

Выдерживание требуемого расстояния между электродом и арматурой достигается применением различных изоляторов, например, из затвердевшего цементного раствора, материалов на основе пластмасс, и других диэлектриков, укрепляемых на арматуре до бетонирования конструкций.

Электроды должны находиться на определенном расстоянии от закладных деталей, устанавливаемом в зависимости от величины подаваемого напряжения. При расположении закладных деталей параллельно плоскости пластинчатых либо полосовых электродов их следует изолировать.

Полосовые электроды следует изготавливать из кровельной или листовой стали. Ширину полосы рекомендуется принимать от 20 до 50 мм. Для более удобного подключения проводов концы электродов с отверстиями должны выступать за кромку опалубки на 50-80 мм.

Стержневые электроды изготавливают, как правило, из круглой катаной стали диаметром 6-8 мм. Длина электрода назначается с учетом того, чтобы он выступал над опалубкой с утеплителем на 5-8 см. При необходимости погружения в бетон стержневых электродов длиной более 0,6 м их диаметр следует увеличивать до 10-12 мм.

Для удобства производства работ плоские электродные группы можно изготавливать в виде решеток с одним приваренным сверху поперечным стержнем и погружать в бетон одновременно всю группу, желательно с вибрированием.

Струнные электроды, изготавливаемые из круглой стали диаметром 6-12 мм, должны быть установлены и закреплены до бетонирования конструкций. Струнные электроды диаметром более 8 мм, следует подвешивать к арматуре на крючках, с надетыми на них изоляторами (например, в виде отрезков резиновой трубки), либо крепить к специальным изолированным поперечным стержням.

Перед началом бетонирования производится осмотр установленных электродов, соединительных проводов, отпаяк и др. В процессе бетонирования необходимо следить за тем, чтобы установленные электроды не были смещены от предусмотренного проектом производства работ положения, что достигается их надежным закреплением до начала бетонирования.

Все элементы и конструкции объемом до 3 м³ необходимо бетонировать без перерывов. При бетонировании монолитных конструкций большего объема или значительной протяженности (перекрытия, полы, днища резервуаров и др.) должны соблюдаться правила назначения местоположения рабочих швов, - установленные СНиП 3.03.01-87 "Несущие и ограждающие конструкции".

При последовательном прогреве нескольких участков, электродная группа, установленная на границе двух участков, должно подключаться к сети при прогреве последующего участка.

Во избежание чрезмерных влагопотерь, при электропрогреве необходимо:

- не превышать предельно допустимую температуру прогрева;
- обеспечивать размеры электродов и их размещение в соответствии с расчетом, не допуская тем самым местных перегревов;
- обязательно укрывать по мере бетонирования неопалубленные поверхности конструкций пароизоляционным материалом (толем, рубероидом, полиэтиленовой пленкой и др.), поверх которого обязательно укладывается утеплитель.

Для обеспечения плотного прилегания накладных электродных панелей к бетону и, соответственно, плотного контакта электродов с бетоном при прогреве горизонтально развитых конструкций, необходимо оказывать легкое вибрационное воздействие на каждую панель в течение нескольких секунд после их укладки.

Утепление верхней поверхности бетона должно выполняться сразу по окончании бетонирования и укладки пароизоляционного слоя, а на конструкциях, имеющих большую открытую поверхность – по мере бетонирования и укладки пароизоляции.

Опалубленные поверхности конструкции, утепление которых предусматривается технологическими картами, должны быть утеплены до начала бетонирования.

Перед подачей напряжения на электроды следует проверить: правильность их установки и подключения; качество контактов и отпаек, которые могли быть нарушены при бетонировании; расположение температурных скважин или установленных в бетоне датчиков температуры; правильность укладки утеплителя.

Замеченные недостатки необходимо устранить, после чего установить временное ограждение с предупредительными плакатами и сигнальными лампами.

Сразу после подачи напряжения на электроды, дежурный электрик должен повторно проверить все контакты, отпайки (пошатыванием, смещением или отключением стержневого электрода), устранить причину короткого замыкания или искрения, если таковые произошли.

При необходимости отключения по каким-то причинам (например, вследствие короткого замыкания) одного из стержневых электродов, рядом следует установить новый электрод, проверить его работоспособность и затем подключить к питающей электропроводке.

В связи с тем, что в процессе подъема температуры токовые нагрузки, как правило, возрастают, необходимо в этот период следить за показаниями измерительных приборов, состоянием контактов и отпаек. Их состояние следует проверять также после каждого переключения напряжения на другую, особенно более высокую ступень.

Концы стержневых электродов и стержней для подведения напряжения к арматуре в случае использования ее в качестве электродов после окончания прогрева должны быть срезаны заподлицо с поверхностью конструкции.

§ 2-8. Техника безопасности при электропрогреве бетона.

Мероприятия по обеспечению безопасного производства электропрогрева должны быть разработаны с учетом требований СНиП 12.-03.2002 "Безопасность труда в строительстве".

К работам по электропрогреву бетона допускаются лица, аттестованные комиссией и получившие удостоверение о знании правил техники безопасности. Они должны быть снабжены резиновыми перчатками и обувью, а в зимнее время – теплой одеждой.

Участок электропрогрева бетона должен быть огорожен временным ограждением с предупредительными надписями и хорошо освещен в темное время суток.

Электрооборудование (трансформаторы, рубильники, пульты управления и т.п.) должны быть защищены от попадания снега или дождя, а также от возможного доступа посторонних лиц.

Металлические токоведущие части трансформаторов, распределительных щитов и софитов, кожухи рубильников должны быть заземлены.

Перед подачей напряжения на электроды необходимо проверить правильность их подключения, исправность проводов, надежность контактных соединений, заземления или зануления электрооборудования. Необходимо убедиться в отсутствии людей на участке электропрогрева.

В случае обнаружения в процессе электропрогрева какой-либо неисправности (замыканий, искрений в контактах, перегрева проводов и т.п.), напряжение должно быть немедленно отключено до устранения неисправности.

Электропрогрев бетона разрешается производить при напряжении электрического тока не свыше 127 В. В сырую погоду, при дожде или сильных снегопадах производить прогрев бетона на открытом воздухе не разрешается.

Замеры температуры уложенного бетона и электромонтажные работы на участке электропрогрева допускается проводить при напряжении на электродах не свыше 60 В. При более высоком напряжении все работы должны осуществляться только при отключенном токе.

Глава 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

§ 3-1. Сущность метода и область применения.

Предварительный форсированный электроразогрев бетонных смесей производится после их приготовления до начала схватывания, быстрой укладки разогретых смесей в конструкцию, их уплотнения и укрытия для последующего термосного выдерживания. Разогревается бетонная смесь электрическим током промышленной частоты при напряжении 380-220В.

Внесенное в бетонную смесь тепло при разогреве повышает химическую активность воды затворения, которая интенсивно начинает реагировать с цементом, что способствует быстрому выделению экзотермического тепла. Благодаря этому в забетонированной конструкции длительное время поддерживается положительная, подчас достаточно высокая температура (до 60-80⁰С), что приводит к быстрому затвердеванию бетона. Уплотнение разогретой бетонной смеси после укладки позволяет обеспечить плотную структуру бетона с высокими физико-механическими характеристиками.

Наибольший эффект предварительного электроразогрева проявляется при бетонировании массивных и средней массивности конструкций с $M_{п}$ до 8м¹. При этом учитывается температура наружного воздуха (а в районах с сильными ветрами – жесткость погоды, т.е. при ветре воздействие температуры оказывается более низким), влияющая на общий тепловой баланс забетонированной конструкции. Интенсивность охлаждения конструкции не должна превышать притока тепла за счет экзотермии по крайней мере до достижения бетоном 40 - 50%-ной прочности от проектного значения. При последующем медленном остывании, твердение бетона продолжается вплоть до достижения температуры 0⁰С.

В сильные морозы при интенсивном остывании бетона в периферийных слоях конструкции ее необходимо утеплять в соответствии с теплотехническим расчетом, учитывающим влияние среды и массивности конструкции.

Применение предварительного электроразогрева бетонных смесей, позволяет возводить бетонные и железобетонные конструкции высокого качества и долговечности с минимальными затратами электрической энергии. При этом методе на бетоно-смесительных узлах отпадает необходимость в зимнее время подогревать заполнители до высоких температур и ограничиваться только их оттаиванием; исключать возможность начала схватывания бетонной смеси (выходящей с невысокой температурой из смесителя) при транспортировке ее к месту укладки; в течение короткого времени разогревать бетонную смесь (не более 15 мин.) до требуемой температуры (50-80⁰С) с минимальными потерями тепла при этой операции и последующей быстрой укладкой и выдерживанием бетона в конструкции по методу термоса.

В конструкциях, забетонированных предварительно разогретой бетонной смесью, формируется благоприятное термонапряженное состояние, благодаря тому, что температура в поверхностных слоях ниже, по сравнению с внутренними и бетон в них твердеет медленнее. За счет экзотермии внутренние слои бетона в конструкции разогреваются, расширяются и наружные слои еще не затвердевшего бетона вследствие возникновения рас-

тягивающих усилий деформируются без трещинообразования. В дальнейшем при затвердевании бетона внутри конструкции, постепенном остывании и сжатии в соответствии с коэффициентом объемного расширения, в поверхностных слоях возникают напряжения сжатия и бетон уплотняется. Все изложенное делает метод предварительного электропрогрева бетонных смесей одним из наиболее эффективных и малоэнергоёмких.

Предварительный разогрев бетонной смеси, как метод зимнего бетонирования, обеспечивает наибольший эффект, как было сказано выше, при бетонировании среднемаассивных монолитных или сборных конструкций (в условиях полигона) с модулем поверхности $M_{\text{п}} \leq 8 \text{ м}^{-1}$ при температуре наружного воздуха до -20°C или с меньшим $M_{\text{п}}$, при более низких температурах.

При бетонировании маломассивных конструкций, в том числе пролетного типа, например, плит перекрытия в монолитном домостроении целесообразно совмещать предварительный разогрев с термоактивным выдерживанием бетона. При этом для компенсации повышенных теплопотерь тонкостенными конструкциями следует использовать, например, термоактивные щиты, греющие одеяла и т.п.

§ 3-2. Технология производства работ.

Как способ ускорения твердения бетона предварительный разогрев может быть применен и в теплое время года для сокращения времени набора бетоном распалубочной прочности.

Предварительному разогреву могут подвергаться бетонные смеси, приготовленные на низко- и среднеалюминатных портландцементях, используемые для обычных бетонов (плотность $1800-2500 \text{ кг/м}^3$), для легких бетонов (плотность $500-1800 \text{ кг/м}^3$), а также мелкозернистых бетонов и цементно-песчаных растворов. Крупность заполнителя бетонной смеси не должна превышать 20 мм; желательно чтобы осадка конуса смеси находилась в пределах 6-12 см. Подвижность бетонной смеси с повышением температуры уменьшается и это надо учитывать при разогреве. Отодвинуть время загустевания можно введением в нее добавок пластификаторов, которые помимо снижения В/Ц могут несколько замедлить сроки схватывания без негативных последствий для последующего твердения бетона.

Расход добавки уточняется опытным путем с учетом необходимости обеспечения в заданное время требуемой прочности. В качестве таких добавок допускается применять С-3 и др.

Для определения возможности разогрева бетонной смеси следует провести опытный разогрев и, если оперирование с разогретой смесью затрудняется, то необходимо внести коррективы в ее состав и устанавливать температуру разогрева, время работы со смесью до момента ее укладки и уплотнения.

Максимальная температура разогрева бетонной смеси зависит, прежде всего, от применяемого цемента и возможного времени оперирования с ней после разогрева (подача к месту бетонирования, укладка в опалубку и уплотнение). Смеси, приготавливаемые на низкоалюминатных портландцемент-

тах (содержание C_3A не выше 6%), можно разогревать до температуры $80^{\circ}C$, на поргладцементях с большим (превышающим 6%) содержанием C_3A , разогревать целесообразно не более чем до $60-70^{\circ}C$. Окончательная температура разогрева устанавливается после опытной проверки изменения сроков схватывания и интенсивности потери подвижности в построечной лаборатории.

Уплотнение бетонной смеси в горячем состоянии практически исключает остаточное тепловое расширение бетона (или оно значительно меньше), которое обычно имеет место при других методах тепловой обработки.

Расчет и подбор составов бетонных смесей, подвергаемых предварительному электроразогреву, осуществляется любым проверенным на практике способом, обеспечивающим получение состава, обладающего к моменту укладки в горячем состоянии необходимой подвижностью, а также заданной прочностью в установленные сроки при наименьшем расходе вяжущего.

Окончательное назначение рабочего состава смеси должно производиться по результатам опытной проверки подвижности разогретой смеси, а также испытаний контрольных образцов, изготовленных из пробных замесов предварительно разогретой бетонной смеси и твердевших после укладки в условиях, аналогичных производственным.

Разогрев бетонной смеси может осуществляться циклично или непрерывно. Для этого в первом случае используются различные устройства – бадьи, специальные бункера для разогрева смеси (рис. 3.1), технологические комплексные линии (рис. 3.2) и переоборудованные бетономешалки, а во втором – установки непрерывного действия.

Порционный разогрев бетонной смеси целесообразно применять в построечных условиях при потоке бетонной смеси менее $10 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Непрерывный разогрев наиболее эффективно использовать на технологических линиях при потоке бетонной смеси более $10 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Продолжительность подъема температуры бетонной смеси до заданной величины обуславливается: интенсивностью ее загустевания, видом и размерами крупного заполнителя, наличием электрических мощностей и т.п. и должна находиться в пределах 5-15 мин.

Расход электрической энергии на разогреве 1 м^3 бетонной смеси зависит от температуры разогрева, конструктивного решения нагревательного устройства, условий окружающей среды и т.п. и ориентировочно может приниматься равным $0,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ для стройплощадок на каждый градус разогрева 1 м^3 бетонной смеси.

Транспортирование разогретой бетонной смеси к месту укладки при порционном разогреве наиболее эффективно производить непосредственно в ёмкости для разогрева.

При непрерывном разогреве бетонная смесь должна подаваться из электродной камеры непосредственно в форму или опалубку. Перегружать разогретую смесь в промежуточные ёмкости не рекомендуется и делать это только в крайнем случае.

Разогретая смесь должна быть уложена в форму или опалубку в возможно короткий срок – не более чем за 15 мин.

Отформованное изделие или забетонированная конструкция могут выдерживаться до приобретения бетоном требуемой прочности различными способами (термос, с обогревом по контуру).

При выдерживании бетона следует учитывать экзотермическое тепло, выделяемое цементом в процессе твердения, величина которого ориентировочно составляет 80 ккал/м^3 .

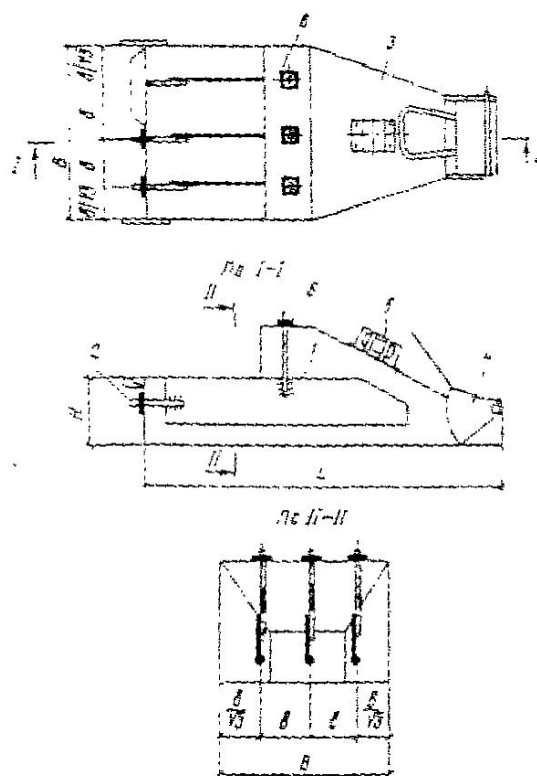


Рис. 3.1. Принципиальная схема бадьи для электроразогрева бетонной смеси

- 1 – электрод; 2 – контактная шпилька; 3 – бункер; 4 – затвор; 5 – вибратор;
 6 – крепление электрода; H, B, L – соответственно высота, ширина и длина бункера; b – расстояние между электродами.

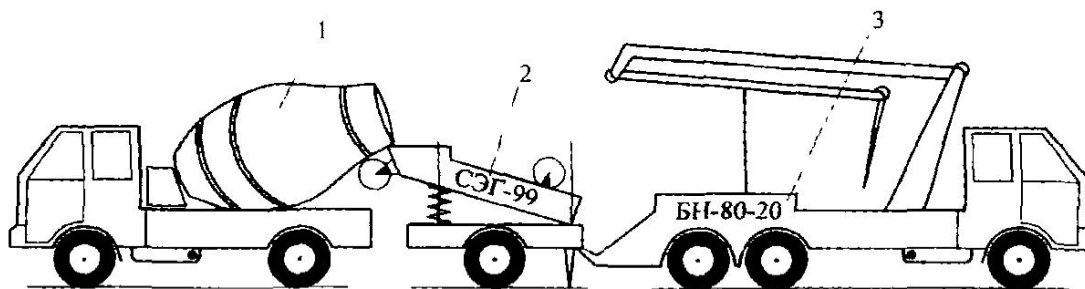


Рис. 3.2. Технологическая комплексная линия для непрерывного электроразогрева бетонной смеси производительностью - 20-40 м³ в смену при потребляемой мощности 50-100 кВт, расходе электроэнергии - 30 кВт ч/м³ при времени разогрева 2-3 мин.

1 - доставка бетонной смеси с автозавода автобетоновозом; 2 - установка непрерывного разогрева; 3 - автобетононасос для подачи разогретой смеси в опалубку возводимых конструкций.

В построечных условиях пост разогрева должен находиться в непосредственной близости от места укладки бетонной смеси.

Схему организации производства, а также способ разогрева выбирают, учитывая условия работы, требуемую производительность линии и наличие энергетических ресурсов.

При порционном разогреве объем порции смеси выбирается из условия обеспечения требуемой мощности, времени сохранения подвижности разогретой смесью до ее укладки.

При определении максимального объема емкости для разогрева следует учитывать также целый ряд производственных ограничений. К ним относятся, например, грузоподъемность крана или другого транспортного средства, максимально допустимые габаритные размеры оборудования, а также удобства в производстве работ. В большинстве случаев объем емкости, ограниченный указанными производственными факторами, обычно не превышает 2 м³.

Количество емкостей для порционного разогрева определяется исходя из условий бесперебойной работы транспорта и непрерывной укладки разогретой бетонной смеси.

Во избежание перекоса фаз питающей сети бетонная смесь должна равномерно распределяться между электродами нагревательного устройства.

В целях уменьшения разброса температуры в процессе разогрева емкость со стационарно закрепленными электродами необходимо заполнять бетонной смесью послойно и одновременно между всеми электродами.

Для равномерного распределения смеси между стационарно незакрепленными электродами, последние погружают в емкость для разогрева, заполненную смесью, при одновременной вибрации.

При порционном разогреве среднюю температуру смеси определяют по показаниям трех-четырех датчиков, расположенных в центре между электродами и стенками бункера.

При непрерывном разогреве средняя температура смеси определяется одним-двумя датчиками, установленными на выходе разогретой смеси.

Для обеспечения равномерности и заданной скорости разогрева смеси необходимо периодически очищать электроды от затвердевшего цементного камня, особенно при порционном способе разогрева.

Для уменьшения площади загрязнения внутренних поверхностей установки, соприкасающихся с бетонной смесью, целесообразно покрыть их (исключая электроды) конструктивным, адгезионным и одновременно электроизоляционным материалом. Для этого можно применить, например, теплостойкую резину, фторопласт или полиэтилен низкого давления.

В процессе эксплуатации установки электроразогрева при перерывах в работе она должна быть освобождена от остатков бетонной смеси промывкой струёй воды под напором.

§ 3-3. Расчёт бункера для порционного электроразогрева бетонной смеси

Объем бункера электроразогрева зависит от объема разогреваемой смеси и определяется по формуле:

$$V_6 = kV, \quad (1)$$

где k - коэффициент уплотнения бетонной смеси к моменту разогрева, учитывающий разрыхленное состояние ее при загрузке в бункер, который с достаточной точностью может быть принят равным 1,2 для обычного бетона и 1,4 – для легкого бетона;

V – объём помещаемой в бункер бетонной смеси, м^3 .

Примечание. Коэффициент уплотнения рекомендуется определять опытным путем как отношение объемного веса в предельно уплотненном состоянии к ее объемному весу в рыхлонасыпном состоянии в бункере.

Определяют потребную электрическую мощность для разогрева бетонной смеси по формуле:

$$P = \frac{C_{пр} \gamma V (t_{кон.} - t_{нач.}) \cdot 60 \cdot \alpha}{3600 \cdot \tau_p}, \quad \text{кВт} \quad (2)$$

Для расчета удобнее пользоваться величиной потребной удельной электрической мощности:

$$P_{уд} = \frac{C_{пр} \gamma (t_{кон.} - t_{нач.}) \cdot 60 \cdot \alpha}{3600 \cdot \tau_p}, \quad \text{кВт/м}^3 \quad (3)$$

где $C_{пр}$ - приведенная удельная теплоемкость бетонной смеси, $\text{кДж/кг} \cdot \text{град}$;

P и $P_{уд}$ – потребные электрические мощности для разогрева бетонной смеси, соответственно, в кВт и кВт/м^3 ;

α - коэффициент, учитывающий потери тепла в период разогрева, который зависит от условий окружающей среды и может быть принят равным в пределах 1,20...1,40;

γ – объемный вес бетонной смеси, кг/м^3 ;

τ_p – продолжительность разогрева, мин.;

$t_{\text{нач.}}$ – начальная температура разогреваемой смеси, °С;

$t_{\text{кон.}}$ – температура смеси по окончании разогрева, °С.

Примечание. При скорости ветра более 6 м/с коэффициент a должен приниматься равным 1,5.

Величина приведенной удельной теплоемкости бетонной смеси определяется по формуле:

$$C_{\text{пр}} = \frac{\sum c_i p_i}{\sum p_i}, \quad (4)$$

где c_i – удельные теплоемкости составляющих бетонную смесь компонентов, кДж/кг·град;

p_i – весовые части составляющих бетонной смеси (цемента, воды и заполнителя).

Удельная теплоемкость воды равна 4,18; цемента – 0,84. Удельная теплоемкость заполнителя должна приниматься с учетом его влажности и определяться по формуле:

$$C_3 = C_{\text{сух}} + 0,01 \omega. \quad (5)$$

Удельная теплоемкость сухого заполнителя ($C_{\text{сух}}$) принимается примерно равной:

гранитный щебень – 0,84;

известняковый щебень – 0,79;

керамзитовый гравий – 0,75;

песок кварцевый – 0,71.

Весовая влажность (ω в %) заполнителя после пребывания его в бетонной смеси в течение одного часа может быть принята равной:

гранитный щебень – 1%;

известняковый щебень – 3-5%;

керамзитовый гравий – 10-12%.

Определяют расстояние между электродами в бункере по формуле:

$$b = \frac{U}{\sqrt{\rho_{\text{расчет}} \cdot P_{\text{уд}} \cdot 1000}}, \quad \text{м} \quad (6)$$

где U – напряжение в сети, В;

$P_{\text{уд}}$ – потребная удельная электрическая мощность для разогрева смеси, кВт/м³;

$\rho_{\text{расчет}}$ – расчетное удельное электрическое сопротивление бетонной смеси, Ом·м;

b – расстояние между электродами, м.

В случае заземленного стального корпуса бункера расстояние между электродами и днищем, а также между электродами и стенками бункера (b) принимается равным $b/\sqrt{3}$.

Мощность (электрическая) установки, равная потребной для электрозагрева бетонной смеси, определяется по формуле:

$$P_{\text{уст}} = \frac{U^2 \cdot 10^{-3}}{b^2 \cdot \rho_{\text{расчет}}}, \quad \text{кВт/м}^3, \quad (7)$$

где U – напряжение в сети, В;

b – расстояние между разнофазными электродами, м;

$\rho_{расчет}$ – расчетное удельное электрическое сопротивление бетонной смеси, Ом·м.

Определяют площадь электрода по формуле:

$$S = \frac{V_6}{nb}, \text{ м}^2 \quad (8)$$

где n – количество равных отсеков в бункере (этой величиной приходится задаваться).

Определяют ширину бункера по формуле:

$$B = b \cdot n + 2b_1, \text{ м} \quad (9)$$

Задаваясь высотой (H) или длиной (L) бункера, определяют одну из этих величин по формуле:

$$H = \frac{S}{L}, \text{ м} \quad \text{или} \quad L = \frac{S}{H}, \text{ м} \quad (10)$$

Для обеспечения суточной производительности (Π) необходимое количество бункеров определяют по формуле:

$$N = \frac{\Pi \cdot \tau_p \cdot k_2}{\tau \cdot V_6 k_3}, \quad \text{шт.} \quad (11)$$

где N – количество бункеров, шт.;

Π – сменная производительность, м³/смена;

k_2 – коэффициент цикличности работы (0,7);

τ_p – продолжительность разогрева смеси, час;

τ – продолжительность работы смены, час;

k_3 – коэффициент использования трансформатора во времени (0,6-0,9).

Определение установленной мощности и выбор трансформатора.

Тип трансформатора назначается исходя из величины максимальной и расчетной мощности, необходимой для электроразогрева бетонной смеси.

Максимальная электрическая мощность для разогрева определяется по формуле:

$$P_{\max} = \frac{U^2 \cdot V}{b \cdot \rho_{\min}} \cdot 10^{-3}, \quad \text{кВт} \quad (12)$$

где ρ_{\min} – минимальное удельное электрическое сопротивление бетонной смеси, Ом·м.

Расчетная электрическая мощность определяется по формуле:

$$P_{\text{расч}} = \frac{P_{\max}}{\eta \cos \varphi \cdot k_4}, \quad \text{кВт} \quad (13)$$

где $\eta \cos \varphi$ – соответственно к.п.д. и коэффициент мощности трансформатора (обычно $\eta \cos \varphi = 0,9$);

k_4 – коэффициент кратковременной допустимой перегрузки трансформатора (может быть принят равным 1,3-1,5).

По расчетной мощности подбирается тип трансформатора таким образом, чтобы соблюдалось условие:

$$P_{\text{ном.тр}} \geq P_{\text{расч}} \quad \text{кВт}$$

Определение тока по фазам и выбор типа кабеля.

Определение тока по фазам из расчета максимально потребляемой мощности:

$$I = \frac{V_1 U}{\sqrt{3} b^2 \rho_2 \eta \cos \varphi} \quad (14)$$

После определения величины тока подбирается сечение проводов, а соответственно и кабеля в зависимости от напряжения, подводимого к первичной обмотке трансформатора.

В зависимости от условий работы подбирается тип кабеля.

§ 3-4. Особенности применения в построчных условиях.

Транспортирование бетонной смеси с бетоносмесительного узла к месту электроразогрева может осуществляться в различных автотранспортных средствах. Смесь в открытых автотранспортных средствах укрывается во избежание попадания в нее атмосферных осадков.

Количество емкостей для разогрева подбирается исходя из суточного потока бетонной смеси, вида транспортных средств, типа используемых грузоподъемных механизмов и т.п.

Объем емкостей, устанавливаемых на посту электроразогрева, должен соответствовать объему одновременно доставляемой с завода бетонной смеси.

Бетонная смесь из транспортных средств выгружается в емкость электроразогрева и равномерно распределяется между электродами. Для уменьшения теплопотерь емкость для электроразогрева рекомендуется утеплять.

При атмосферных осадках открытая часть емкости должна укрываться от попадания в бетонную смесь влаги.

Для уменьшения теплопотерь с подветренной стороны площадки рекомендуется устанавливать сплошной щит высотой не менее 2м на расстоянии 1-1,5м от поста разогрева.

Электроразогрев бетонной смеси должен производиться на спланированной горизонтальной площадке с деревянным настилом и с ограждением металлической сеткой высотой 1,5-1,7м (рис. 3.3). Щит управления электроразогревом выносится за ограждение.

Электроразогрев бетонной смеси осуществляется в следующем порядке:

- очищенные от бетонной смеси емкости устанавливаются на площадке для разогрева;
- производится загрузка емкостей бетонной смесью с равномерным ее распределением между электродами;
- к корпусу емкостей подсоединяется провод от защитного заземления, нулевой провод от питающей сети и затем подключаются к питающей сети электроды;
- в бетонную смесь устанавливают термометры или термодатчики;

- проверяется надежность контактов, после чего персонал выходит за пределы ограждения и на электроды подается напряжение;
- по достижении бетонной смесью заданной температуры ток выключается, затем последовательно отключаются электроды, нулевой провод и провод защитного заземления;
- емкости с разогретой смесью подаются к месту ее укладки.

Укладка бетонной смеси должна производиться в быстром темпе и, по возможности, непрерывно. Смесь подается в конструкцию непосредственно из емкости электроразогрева. Промежуточная (перед бетонированием) перегрузка разогретой бетонной смеси не допускается. Сразу после уплотнения неопалубленная поверхность бетона тщательно укрывается паротеплоизоляционными матами или слоем паронепроницаемого материала (толь, полиэтиленовая пленка, прорезиненная ткань и т.п.), а за тем слоем теплоизоляции. Теплоизоляция должна защищаться от намокания и увлажнения при дождях и мокром снегопаде.

Перерывов в укладке бетона в конструкцию следует избегать. При неизбежных перерывах поверхность бетона до возобновления бетонирования тщательно укрывается и утепляется.

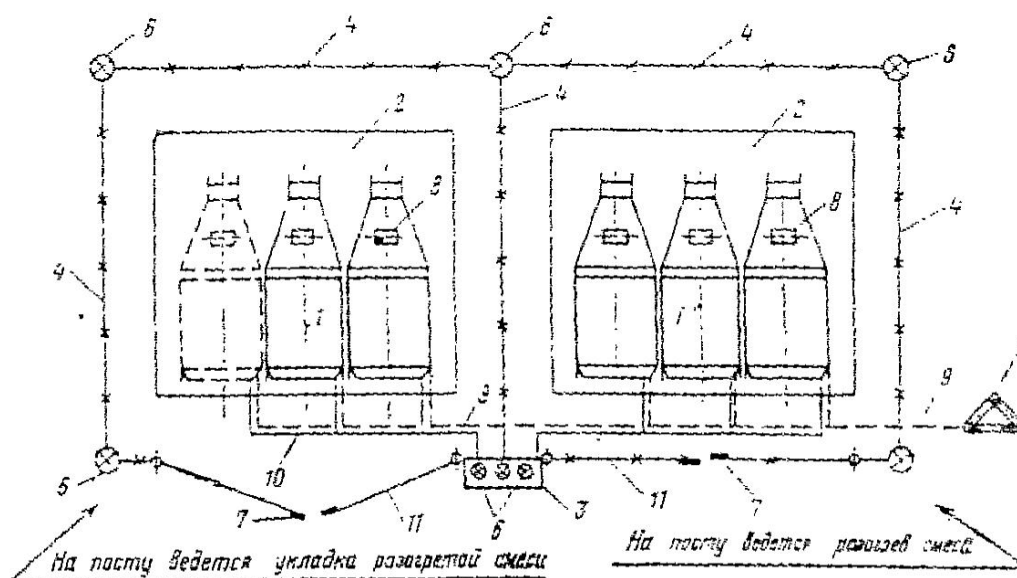


Рис. 3.3. Принципиальная схема площадки для разогрева бетонной смеси

- 1— бункер разогрева; 2— деревянный настил; 3— пульт управления;
 4— ограждение; 5— контур заземления; 6— светильники; 7— концевые выключатели (блокировка); 8— вибратор площадочный; 9— заземляющий кабель; 10— токоподводящий кабель; 11— ворота.

§ 3-5. Установки непрерывного действия.

Из большого многообразия устройств для предварительного непрерывного электроразогрева бетонной смеси требованиям эксплуатационной технологичности в наибольшей степени удовлетворяет установка для термовиброобработки бетонной смеси. Термовиброобработка бетонной смеси (ТВОБС) – это разновидность предварительного разогрева. Ее суть заключается в непрерывном, форсированном (за 1 – 3 минуты) разогреве бетонной смеси электрическим током с одновременным воздействием на нее вибрации, избыточного давления и пара. Из комплекса указанных воздействий основными являются разогрев и вибрация, что и предопределило название способа обработки смеси и оборудования для его осуществления. Причем вибрация используется, прежде всего, как средство транспортирования смеси в процессе ее обработки. Активирующее влияние вибрации, а так же воздействие на смесь избыточного давления, пара и электрических полей, имеющих место при электроразогреве, проявляется в повышении качества бетона, в том числе его прочности, по сравнению с чистым разогревом смеси.

Общий вид установки ТВОБС, рекомендуемой к применению, представлен на рис.3.4. Основными узлами установки являются: загрузочный бункер; вертикальная греющая труба; наклонная греющая труба с затвором; подъемно-опускаемое устройство и электрический шкаф (не показан).

На внутренней поверхности вертикальной трубы электроизолированно закреплены токосъемные электроды, подключенные к жилам силового кабеля электросети переменного тока напряжением 380/220 В. В поперечном сечении электроды имеют треугольную форму, причем смежные грани соседних электродов параллельны.

Корпус наклонной трубы занулен, а внутри корпуса коаксиально размещен электроизолированный центральный стержень с кольцевыми токосъемными электродами.

Труба с бункером сопряжена упруго-герметично. Сочленение греющих труб жесткое и осуществляется через воронку с переходным патрубком с помощью клиновых соединений. На корпусе трубы закреплены подъемно-опускаемое устройство, используемое для разъединения труб на время очистки, и вибраторы. Привод затвора гидравлический, для его работы предусмотрена насосная станция.

Работает установка следующим образом. Бетонная смесь, приготовленная и доставленная на строительную площадку по традиционной технологии, загружается в бункер при закрытом затворе. Для заполнения внутреннего объема установки бетонной смесью и обеспечения плотного контакта смеси с электродами на 3-5 секунд включается вибратор. Подается напряжение на электродные секции. После достижения бетонной смесью заданной температуры (порядка 70 – 80 °С), т.е. через 1,5 – 2 минуты открываются заслонки затвора, включается вибратор. Дальнейший процесс обработки смеси идет в установившемся режиме. Поскольку за такое короткое время разогрева бетонной смеси до указанной температуры нагревается жидкая фаза, а от нее зерна цемента и песка, то крупный наполнитель нагревается позже за счет теплопроводности от разогретых компонен-

тов смеси, вследствие чего после выхода из установки средняя температура смеси падает на 5-20⁰С (зависит от количества и крупности заполнителя).

Производительность установки регулируется величиной открытия-закрытия затвора, при этом задаваемая температура разогрева бетонной смеси поддерживается автоматически с точностью ± 3 °С, а ее визуальный контроль осуществляется оператором по показаниям приборов, расположенных на лицевой панели шкафа управления. Управление работой установки осуществляет бетонщик-оператор с помощью выносного пульта.

Процессы, происходящие в бетонной смеси при ее термовиброобработке можно представить следующим образом. В соответствии с законом Джоуля-Ленца при прохождении тока через бетонную смесь, обладающую электрическим сопротивлением, в ней выделяется тепло. Повышенная температура интенсифицирует реакции гидратации цемента.

Вибрация приводит к дефлокулизации зерен цемента, частичной их диспергации, которая дополняется химической диспергацией. Разогрев смеси сопровождается частичным превращением воды в пар, а так как обработка происходит в закрытом объеме, это приводит к появлению избыточного давления порядка 0,01 МПа. Уменьшение вязкости воды при повышенных температурах, наличие пара, проницаемость которого значительно выше проницаемости воды, в сочетании с избыточным давлением – все это способствует большему проникновению влаги внутрь зерен цемента. Совокупность указанных воздействий интенсифицирует химические реакции, приводит к увеличению массы цемента, вовлекаемой во взаимодействие с водой.

§ 3-6. Принципы конструирования установок для термовиброобработки бетонной смеси.

Излагаемые ниже принципы распространяются на все или большинство устройств для предварительного электроразогрева бетонных смесей. Способы реализации этих требований и рекомендаций относятся к устройствам, рекомендуемым к внедрению, а именно: к устройствам, типа “труба в трубе” (табл.3.1).

Принцип *технологичности* заключается в инженерной реализации основных технологических параметров. Следует подчеркнуть, что соблюдение принципа технологичности определяет жизнеспособность оборудования и технологии с его использованием.

Принцип *безопасности* состоит в выявлении факторов опасности и устранении или сведении к минимуму их негативного воздействия на работающих. В установках предварительного электроразогрева бетонной смеси факторами опасности являются электрический ток, вибрация и повышенная температура, а также высота.

Принцип *экономичности*. Эффективность метода термовиброобработки бетонной смеси дополняется рядом конструктивно-технологических решений, обеспечивающих экономичность создания и эксплуатации установок.

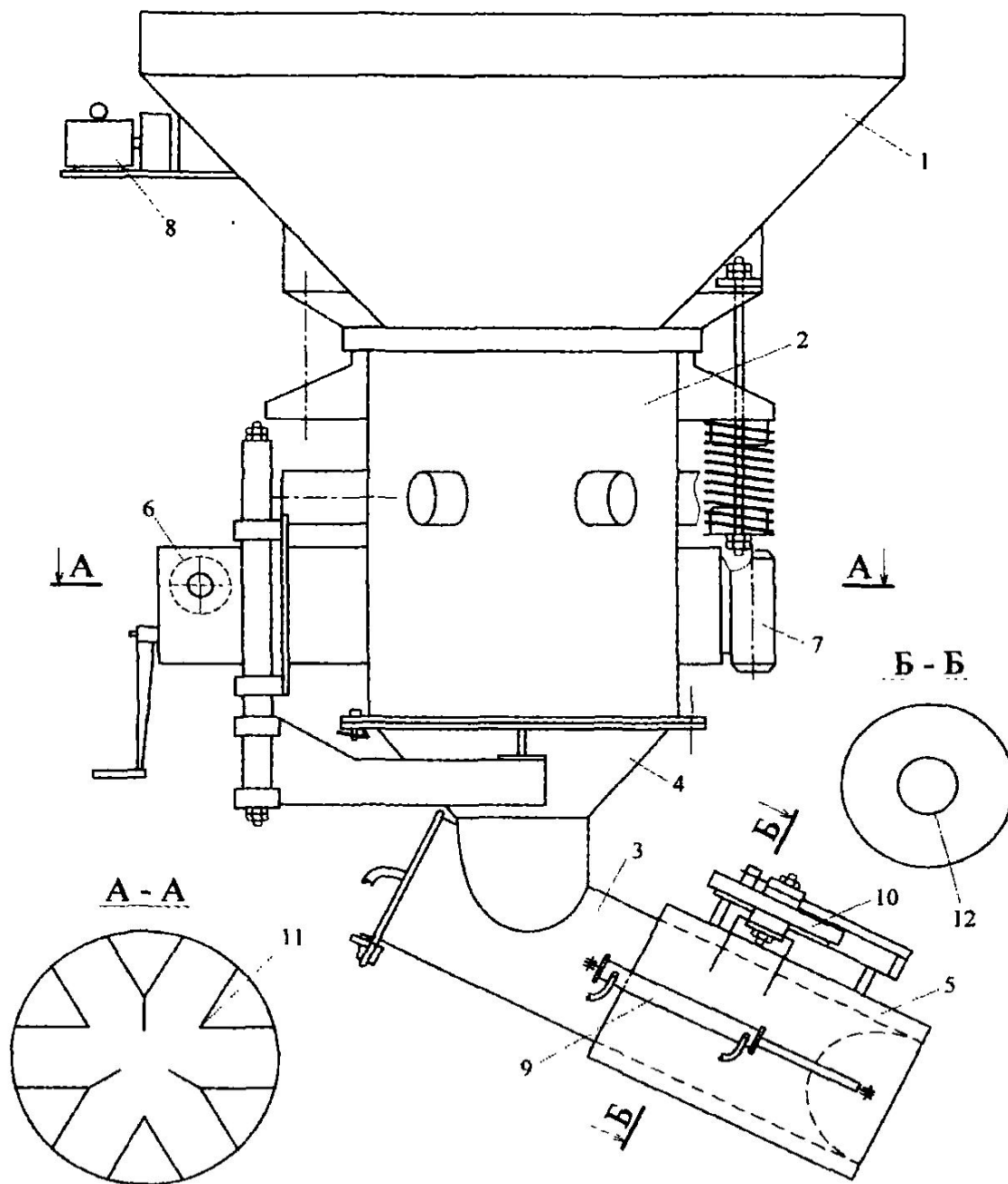


Рис. 3.4. Общий вид установки ТВОБС по проекту ТТК-01.

- 1 - загрузочный бункер; 2 - труба греющая вертикальная; 3 - труба греющая наклонная; 4 - воронка с переходным патрубком; 5 - затвор; 6 - подъемник; 7 - вибратор; 8 - насосная станция; 9 - гидроцилиндр; 10 - синхронизирующий механизм; 11 - электроды треугольные; 12 - электроды кольцевые.

Принцип *комплектности*. В этот принцип вкладывается следующий смысл. Установки ТВОБС необходимо разрабатывать во взаимоувязке всех функциональных элементов, в т. ч. системами питания и управления.

Применительно к реальным условиям производства (конкретное значение удельного электрического сопротивления бетонной смеси, имеющаяся свободная электрическая мощность) требуется уточнить эксплуатационные параметры установки ТВОБС.

Независимо от исходных данных и решаемых задач во всех случаях должны быть увязаны между собой три вида расчетов:

расчеты производительности установки по пропускной способности поперечного сечения камеры разогрева, по длине ее электродной части и времени прохождения смеси через зону разогрева;

электротехнический расчет, заключающийся в определении сопротивления бетонной смеси, силы тока, электрической мощности и расхода электроэнергии;

теплотехнический расчет, сводящийся к определению расхода тепла, необходимого для нагрева до задаваемой температуры определенного объема бетонной смеси, характеризующейся конкретными значениями плотности и теплоемкости.

Решение каждой из указанных выше задач заключается в увязке задаваемых параметров или значений параметров, получаемых в каждом из названных расчетов.

§ 3-7. Расчет параметров установки ТВОБС.

При расчете установки ТВОБС, используются следующие параметры:

$t_{нбс}$ – начальная температура бетонной смеси, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{рбс}$ – температура разогрева бетонной смеси, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{ррч}$ – температура разогрева растворной части, $^{\circ}\text{C}$;

$\gamma_{бс}$ – плотность бетонной смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$C_{бс}$ – удельная теплоемкость бетонной смеси, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$;

$V_{бс}$ – объем бетонной смеси, м^3 ;

$G_{рч}$, $G_{ц}$, $G_{в}$, $G_{п}$, $G_{кз}$ – масса, соответственно, растворной части, цемента, воды, песка, крупного заполнителя, кг ;

$C_{рч}$, $C_{ц}$, $C_{в}$, $C_{п}$, $C_{кз}$ – удельная теплоемкость, соответственно, растворной части, цемента, воды, песка, крупного заполнителя, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$;

$\rho_{но}$, ρ_p – удельное электрическое сопротивление бетонной смеси, соответственно, к началу обработки, расчетное, $\text{Ом} \cdot \text{м}$;

R – электрическое сопротивление бетонной смеси, Ом ;

$S_{пс}$ – площадь поперечного проходного сечения электродной части камеры разогрева, м^2 ;

$L_{эл}$ – длина электродной части камеры разогрева, м ;

$S_{эл}$ – площадь поверхности токосъемных электродов, м^2 ;

a – размер электрода (длина кольцевых секций или ширина полосовых секций), м ;

b – расстояние между токосъемными электродами (секциями), м ;

Таблица 3.1

Принципы конструирования установок ТВОБС и рекомендации по их реализации.

№ п/п	Содержание принципов, Требований	<i>Рекомендации по реализации принципов, требований</i>
1	2	3
1. Эксплуатационная технологичность		
1.1	Удобство очистки камеры разогрева	<p>1.1.1. Сведение к минимуму длины камеры разогрева за счет:</p> <ul style="list-style-type: none"> а) размещения токосъемных электродов на внутренней поверхности наружной трубы (для ТВО); б) вертикальное размещение камеры разогрева и оснащение ее треугольными электродами. <p>1.1.2. Применение быстроразъемных соединений для крепления разгрузочного устройства.</p> <p>1.1.3. Выполнение внутренних поверхностей камеры разогрева из антиадгезионных материалов.</p>
1.2	Стабильность процесса Разогрева Смеси	<p>1.2.1. Обеспечение равномерной плотности тока по объему обрабатываемой смеси за счет увязки межэлектродного расстояния с максимально допустимой напряженностью электрического поля.</p> <p>1.2.2. Обеспечение одинаковой скорости перемещения смеси по камере разогрева в пределах всех зон ее поперечного сечения.</p>
1.3	Возможность управления режимом обработки (по температуре и производительности)	<p>1.3.1. регулирование производительности установки и температуры разогрева смеси за счет:</p> <ul style="list-style-type: none"> а) изменения межэлектродного расстояния (сменный центральный стержень у ТВО, сменные электроды у ТГВ); б) схемы подключения токосъемных электродов (по звезде или треугольнику); в) изменения времени подачи напряжения на электроды при постоянной величине напряжения; г) изменения величины напряжения при постоянном включении электродов; д) изменения величины открытия-закрытия заслонок затвора. <p>1.3.2. Наличие системы контроля за температурой смеси в процессе ее обработки и на выходе из камеры разогрева.</p> <p>1.3.3. Использование системы автоматического поддержания температуры разогрева смеси.</p>

1	2	3
1.4	Долговечность	1.4.1. Футеровка внутренней поверхности камеры разогрева износостойкими материалами. 1.4.2. Возможность замены токосъемных электродов камеры разогрева. 1.4.3. Возможность замены отдельных узлов и агрегатов установки ТВОБС. 1.4.4. Виброизоляция электрошкафа с системами управления и автоматики.
2. Безопасность и безвредность		
2.1	Электро-Безопасность	2.1. Заземление и зануление корпуса установки, защитное отключение.
2.2	Безопасность Перемещения установки	2.2.1. Установка звонка. 2.2.2. Установка ограничителей хода тележки и портала, конечных выключателей.
2.3	Безопасность при загрузке установки	2.3 Устройство рабочих площадок, оснащение их ограждениями.
2.4	Исключение влияния вредных факторов на исполнителей	2.4.1. Устройство выносного пульта управления. 2.4.2. Ограничение температуры разогрева смеси до 80°C.
3. Экономичность		
3.1	Снижение Стоимости Изготовления.	3.1. Унификация узлов и деталей. 3.2. Использование серийно-выпускаемых комплектующих.
4. Комплексность проектирования.		
4.	Комплексность проектирования	4.1. Разработка во взаимосвязке всех функциональных элементов установки ТВОБС.

P – производительность установки ТВОБС, м³/час;
 η – КПД процесса;
 $P_{тн}, P_{эт}$ – требуемая мощность, определяемая, соответственно, теплотехническим и электротехническим расчетами, кВт;
 $W_{тн}, W_{эт}$ – расход электроэнергии, определяемый, соответственно, теплотехническим и электротехническим расчетами, кВт · ч/м³;
 E – напряженность на электроде, В/м;
 U – напряжение, В;
 I – сила тока, А;
 τ_p – время разогрева бетонной смеси, мин.

Производительность установки ТВОБС определяется, с одной стороны, пропускной способностью камеры разогрева, а с другой стороны – способностью передать бетонной смеси требуемое количество тепловой энергии за заданное время.

С позиций пропускной способности производительность установки (П) зависит от площади поперечного сечения камеры разогрева (S_{nc}), длины электродов ($L_{эл}$) и времени прохождения бетонной смеси через электродную часть камеры разогрева (τ_p);

$$П = \frac{S_{nc} \cdot L_{эл} \cdot 60}{\tau_p} \quad \text{м}^3/\text{час} \quad (1)$$

τ_p задается в пределах 1 – 3 мин или принимается по расчету при сопоставлении расчетов электронергии, определенных по теплотехническому ($W_{тт}$) и электротехническому ($W_{эт}$) расчетами (см. ниже).

Зная начальную температуру бетонной смеси ($t_{нбс}$) и температуру разогрева бетонной смеси ($t_{рбс}$), а также объем ($V_{бс}$), плотность ($\gamma_{бс}$) и удельную теплоемкость бетонной смеси ($C_{бс}$), можно определить требуемое количество тепла ($W_{тт}$):

$$W_{тт} = \frac{V_{бс} \cdot \gamma_{бс} \cdot C_{бс} \cdot (t_{рбс} - t_{нбс})}{3600} \quad \text{кВт} \cdot \text{ч} \quad (2)$$

3600 – тепловой эквивалент (коэффициент перевода кДж в кВт).

Удельную теплоемкость бетонной смеси ($C_{бс}$) рекомендуется определять с учетом расхода воды (B , л/м³) по формуле, предложенной профессором Баталовым В.С.:

$$C_{бс} = 0,87666 + 0,00134 B, \quad \text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C} \quad (3)$$

Допускается принимать осредненное значение $C_{бс} = 1,11$ кДж/кг \cdot ⁰С.

Чтобы за время разогрева (τ_p) бетонная смесь усвоила количество тепла ($W_{тт}$) с учетом КПД процесса обработки смеси (η), необходима мощность ($P_{тт}$):

$$P_{тт} = \frac{W_{тт} \cdot 60}{\tau_p \cdot \eta}, \quad \text{кВт} \quad (4)$$

КПД процесса (η) рекомендуется принимать в пределах 0,75 – 0,85.

Требуемое количество тепла, определяемое по формуле (2), и мощность, определяемая по формуле (4), должны соответствовать значениям аналогичных параметров, определяемых электротехническим расчетом.

Важнейшим параметром, используемым при выполнении электротехнических расчетов, является электрическое сопротивление бетонной смеси (R). Для устройств типа «труба в трубе», R зависит: от расчетного удельного электрического сопротивления (ρ_p); длины электродной части камеры разогрева ($L_{эл}$); соотношения внутреннего диаметра наружной трубы (D) и наружного диаметра внутренней трубы (d), а также от степени заполненности электродами камеры разогрева, характеризующейся коэффициентом $K_{зп}$:

Примечание. Нумерация формул относится только к расчету установки ТВОБС.

$$R = \frac{\rho_p}{2\pi L_{\text{э}} \cdot K_{\text{э}}} \ln \frac{D}{d}, \quad \text{Ом} \quad (5)$$

Коэффициент $K_{\text{э}}$ определяется отношением площади токоъемных электродов к площади внутренней поверхности электродной части камеры разогрева.

С учетом формулы (5) расчетная сила тока в камере разогрева (I_p):

$$I_p = \frac{U_p \cdot 2\pi \cdot L_{\text{э}} \cdot K_{\text{э}}}{\rho_p \cdot \ln \frac{D}{d}}, \quad \text{А} \quad (6)$$

ρ_p – расчетное удельное электрическое сопротивление смеси, Ом·м рекомендуется принимать по формуле 7 в зависимости от начального сопротивления ($\rho_{\text{но}}$) и температуры разогрева бетонной смеси ($t_{\text{рбс}}$).

$$\rho_p = \rho_{\text{но}} \left(0,6 + \frac{10}{t_{\text{рбс}}} \right), \quad \text{Ом·м.} \quad (7)$$

Удельное сопротивление бетонной смеси к началу ее обработки определяется по известной методике.

Расчетное напряжение $U_p = U_{\phi} = 220 \text{ В}$.

По расчетным величинам тока (I_p) и напряжения (U_p) можно определить выделяемую (потребляемую) электрическую мощность ($P_{\text{эт}}$).

$$P_{\text{эт}} = I_p \cdot U_p, \quad \text{кВт} \quad (8)$$

С учетом времени разогрева (τ_p) и КПД процесса расход электроэнергии ($W_{\text{эт}}$) составит:

$$W_{\text{эт}} = \frac{U_p^2 \cdot 2\pi \cdot L_{\text{э}} \cdot K_{\text{э}} \cdot \tau_p}{\rho_p \cdot \ln \frac{D}{d}}, \quad \text{кВт·ч} \quad (9)$$

Используя формулы (2) и (9), можно вычислить время разогрева (τ_p):

$$\tau_p = \frac{W_{\text{эт}} \cdot \rho_p \cdot \ln \frac{D}{d} \cdot 60}{U_p^2 \cdot 2\pi \cdot L_{\text{э}} \cdot K_{\text{э}} \cdot \eta}, \quad \text{мин} \quad (10)$$

Расчет камеры разогрева с треугольными электродами, которые через один оснащены дополнительными пластинками (рис. 3.5).

Будем считать электроды без дополнительных пластин нечетными, а с пластинами – четными. В поперечном сечении камеры разогрева электрическое поле будет складываться из двух составляющих. Первая составляющая электрического поля будет действовать между смежными гранями соседних электродов. Между соседними гранями четных и нечетных электродов будет располагаться шесть участков бетонной смеси, каждый из них характеризуется сопротивлением R_1 .

Вторая составляющая электрического поля будет действовать между смежными соседними гранями пластин четных электродов. Каждый из трех участков будет характеризоваться сопротивлением R_2 .

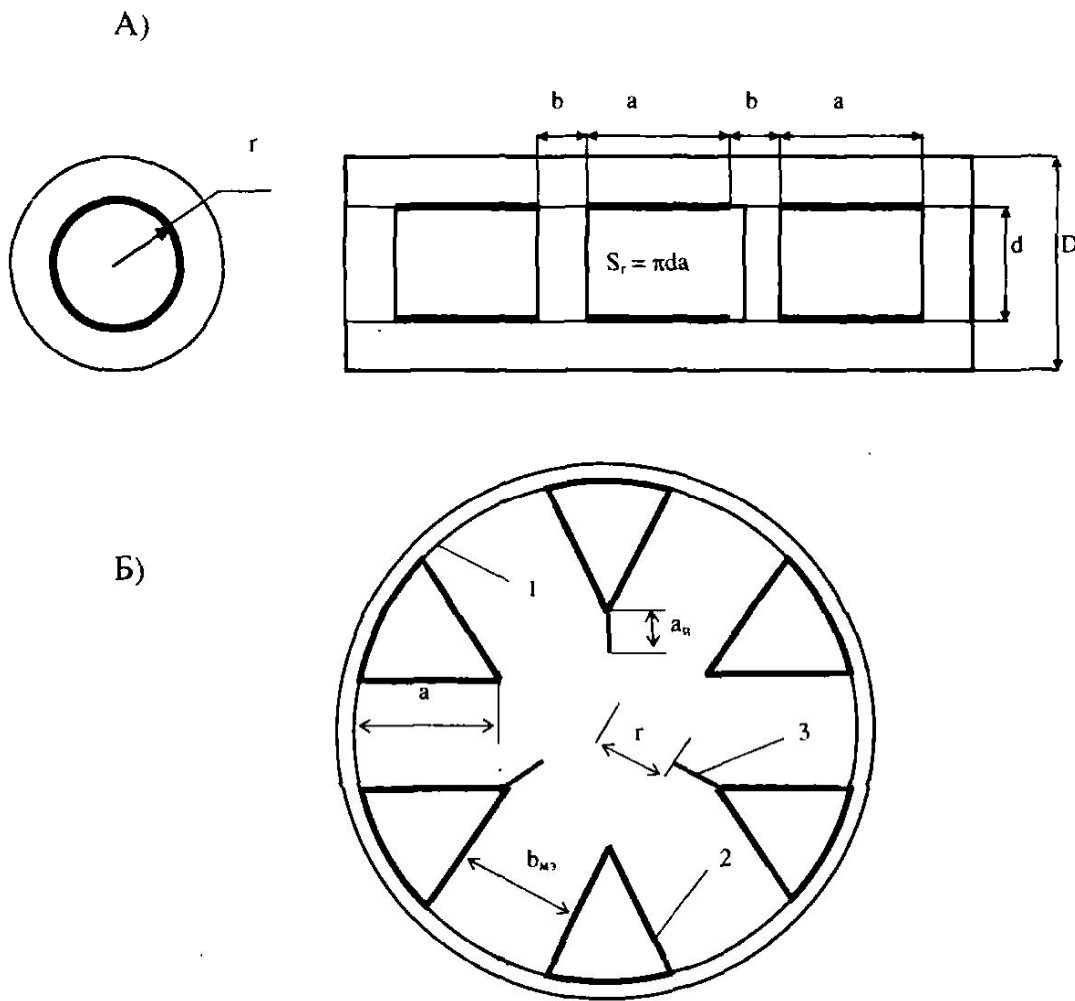


Рис. 3.5. Расчетные схемы камер разогрева.

А) наклонной трубы с кольцевыми электродами;

Б) вертикальной трубы с треугольными электродами.

а- ширина грани треугольного электрода; б- расстояние между электродами;
 д- диаметр кольцевого электрода; D- диаметр наклонной трубы;
 1- вертикальная труба; 2- треугольный электрод; 3- выступ треугольного электрода; a_n - высота выступа треугольного электрода; b_{m3} - расстояние между треугольными электродами; r - расстояние от выступа треугольного электрода до центра трубы.

Считая, что первая составляющая поля расположена между плоско-параллельными электродами, электрическое сопротивление (R_1) каждого из шести участков будет равно:

$$R_1 = \frac{2\rho_r \cdot b_{m3}}{L_1(2a - a_n)}, \text{ Ом} \quad (11)$$

где ρ_r -расчетное удельное электрическое сопротивление, Ом·м (см. ф-лу 7);
 b_{m3} – расстояние между соседними гранями треугольных электродов, м;

L_3 – длина электродов, м;
 a – ширина грани треугольного электрода, м;
 a_n – ширина пластины, м;

Принимая во внимание, что дополнительные пластины расположены в радиальных плоскостях, а смежные пластины направлены навстречу друг другу под углом α , сопротивление каждого из трех участков бетонной смеси между смежными пластинами составит:

$$R_2 = \frac{\rho_p \cdot \text{ctg} \alpha \cdot (2r + a_n)}{2a_n \cdot L_n}, \quad \text{Ом} \quad (12)$$

где r – расстояние дополнительной пластины до центра камеры, м;
остальное см. выше.

$$\alpha = 90 - \frac{360}{n}, \quad \text{град} \quad (13)$$

где n – число треугольных электродов.

Общая сила тока в камере разогрева составит:

$$I = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}, \quad \text{А} \quad (14)$$

где U_1 и U_2 – напряжение действующее, соответственно, на первом и втором участках в зависимости от схемы подключения электродов, В.

Остальные параметры камеры разогрева, оснащенной треугольными электродами (расход электроэнергии, мощность), определяются по ранее приведенным формулам.

§ 3-8. Учет недогрева крупного заполнителя.

Электрический ток проходит через растворную часть бетонной смеси, главным образом, через ее водоцементную составляющую с растворенными в ней продуктами гидратации цемента, в которой происходит выделение тепла. Это тепло кондуктивно, т.е. посредством теплопроводности передается заполнителю. Установлено, что в смесях, подвергаемых термовиброобработке, температурное выравнивание между всеми ее плотными компонентами происходит через 3 – 5 мин после окончания процесса разогрева. При пористых заполнителях выравнивание температуры может происходить через 8-10 мин. и зависит от крупности зёрен.

При управлении режимом обработки бетонной смеси приходится оперировать температурой разогрева ее растворной части, которая фиксируется датчиком, установленным в нижней части камеры разогрева.

Из изложенного следует, что для получения требуемой температуры бетонной смеси необходимо знать температуру разогрева ее растворной части и температуру недогрева крупного заполнителя к моменту окончания процесса обработки смеси. Недогрев крупного заполнителя ($\Delta t_{нкз}$), как разницу между температурой разогрева растворной части смеси ($t_{ppч}$) и

температурой нагрева крупного заполнителя ($t_{нкз}$), можно определить по формуле:

$$\Delta t_{нкз} = t_{ррч} - t_{нкз} = \frac{1}{15} \cdot \frac{\nu_r B^2}{a_r}, \quad ^\circ\text{C} \quad (15)$$

где ν – скорость разогрева смеси, $^\circ\text{C}/\text{час}$;

B – максимальный размер зерен крупного заполнителя, м;

a_r – температуропроводность гранул заполнителя, $\text{м}^2/\text{ч}$.

Температура разогрева растворной части бетонной смеси, может быть определена из уравнения теплового баланса:

$$G_{рr} C_{рr} (t_{ррч} - t_{нбс}) + G_{кз} C_{кз} (t_{ррч} - t_{нбс} - \Delta t_{нкз}) = G_{бс} C_{бс} (t_{рбс} - t_{нбс}) \quad (16)$$

Теплоемкость растворной части:

$$G_{рr} C_{рr} = G_{ц} C_{ц} + G_{в} C_{в} + G_{п} C_{п} = V_{бс} (P_{ц} C_{ц} + P_{в} C_{в} + P_{п} C_{п}), \text{кДж}/^\circ\text{C} \quad (17)$$

Теплоемкость крупного заполнителя:

$$G_{кз} C_{кз} = V_{бс} P_{кз} C_{кз}, \quad \text{кДж}/^\circ\text{C} \quad (18)$$

Теплоемкость бетонной смеси:

$$G_{бс} C_{бс} = V_{бс} \gamma_{бс} C_{бс}, \quad \text{кДж}/^\circ\text{C} \quad (19)$$

В формулах (16) – (19) обозначено:

$G_{рr}$, $G_{ц}$, $G_{в}$, $G_{п}$, $G_{кз}$, $G_{бс}$ – масса, соответственно, растворной части, цемента, воды, песка, крупного заполнителя, бетонной смеси, кг;

$C_{рr}$, $C_{ц}$, $C_{в}$, $C_{п}$, $C_{кз}$, $C_{бс}$ – удельная теплоемкость, соответственно, растворной части, цемента, воды, песка, крупного заполнителя, бетонной смеси, $\text{кДж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$;

$V_{бс}$ – объем разогреваемой бетонной смеси, м^3 ;

$P_{ц}$, $P_{в}$, $P_{п}$, $P_{кз}$ – удельный расход, соответственно, цемента, воды, песка, крупного заполнителя, $\text{кг}/\text{м}^3$.

§ 3-9. Особенности бетонирования конструкций разогреваемыми смесями и последующего выдерживания бетона.

Схемы технологической привязки установок ТВОБС.

При непрерывном режиме работы установки ТВОБС обработка бетонной смеси должна осуществляться в зоне бетонирования конструкций. При этом процесс обработки смеси необходимо увязать с процессом ее распределения и укладки.

Распределение обработанной бетонной смеси в *построечных условиях* является достаточно сложной задачей из-за постоянного перемещения фронта бетонирования в плане и по высоте в пределах возводимого объекта.

Подачу и распределение бетонной смеси наиболее просто осуществлять при работе установки ТВОБС, подвешенной на крюке крана.

Принципиальные отличия использования установок ТВОБС на крюке крана от поворотного бункера с пластинчатыми электродами для пор-

ционного разогрева смеси с которого начинался предварительный разогрев: в каждый момент времени разогревается не весь объем смеси, загруженный в бункер, а только та ее часть, которая проходит через камеру разогрева ($0,1 - 0,2 \text{ м}^3$), что существенно уменьшает время разогрева этой порции смеси, опасность потери подвижности разогретой смеси сводится к минимуму еще и потому, что обработка смеси осуществляется в установке, находящейся на крюке крана, непосредственно перед укладкой в опалубку; смесь подвергается не только электроразогреву, но и другим технологическим воздействиям (вибрации, избыточному давлению, обработке паром), что повышает эффективность обработки.

Таким образом, схема “кран – установка ТВОБС” является для построечных условий наиболее целесообразной, т.к. преимущества комплексной обработки бетонной смеси, в основу которой положен непрерывный электроразогрев, дополняются возможностью подачи бетонной смеси в любую точку возводимого объекта, определяемую зоной действия грузоподъемного крана.

Камеры разогрева последних модификаций установок ТВОБС имеют сравнительно небольшую длину (до 2,0 м при производительности $6 \text{ м}^3/\text{час}$), а также возможность быстрого доступа к внутренним поверхностям для их очистки.

Это позволило на новом качественном уровне вернуться к бетонированию конструкций разогретыми смесями по схеме “кран-бадьа”. При этом могут быть использованы установки двух типов, работающие на крюке крана, отличающиеся конструктивно-компоновочными схемами. По первому типу установка ТВОБС построечного типа представляет собой поворотный бункер специальной конструкции и сопряженный с ним наклонно расположенный термовиброорган (рис. 3.6). Достоинства этого типа установок ТВОБС: возможность подачи бетонной смеси из автотранспортного средства непосредственно в бункер установки; удобство очистки камеры разогрева после перевода термовиброоргана (ТВО) из рабочего положения в положение для очистки. Недостатки первого типа установок связаны с наклонным расположением термовиброоргана: необходимость в промежуточном патрубке для сопряжения ТВО с бункером; трудность удаления последней порции бетонной смеси и перекося фаз при разогреве этой порции.

В установках ТВОБС второго типа термовиброорган расположен вертикально, что упрощает его сопряжение с бункером, имеющим круглую форму в плане. Вертикальное расположение камеры разогрева обеспечивает равномерную загрузку фаз и не вызывает затруднений с удалением последней порции бетонной смеси. Однако в этом случае для размещения установки ТВОБС во внерабочем положении требуется временная инвентарная опора, а для ее загрузки бетонной смесью нужна эстакада (рис.3.7). Исполнение временной опоры и эстакады инвентарными сводит этот недостаток к минимуму.

На время загрузки установки бетонной смесью и ее обслуживания, в том числе очистки, используется временная инвентарная опора. Загрузка установки из автобетоносмесителя производится с инвентарной эстакады.

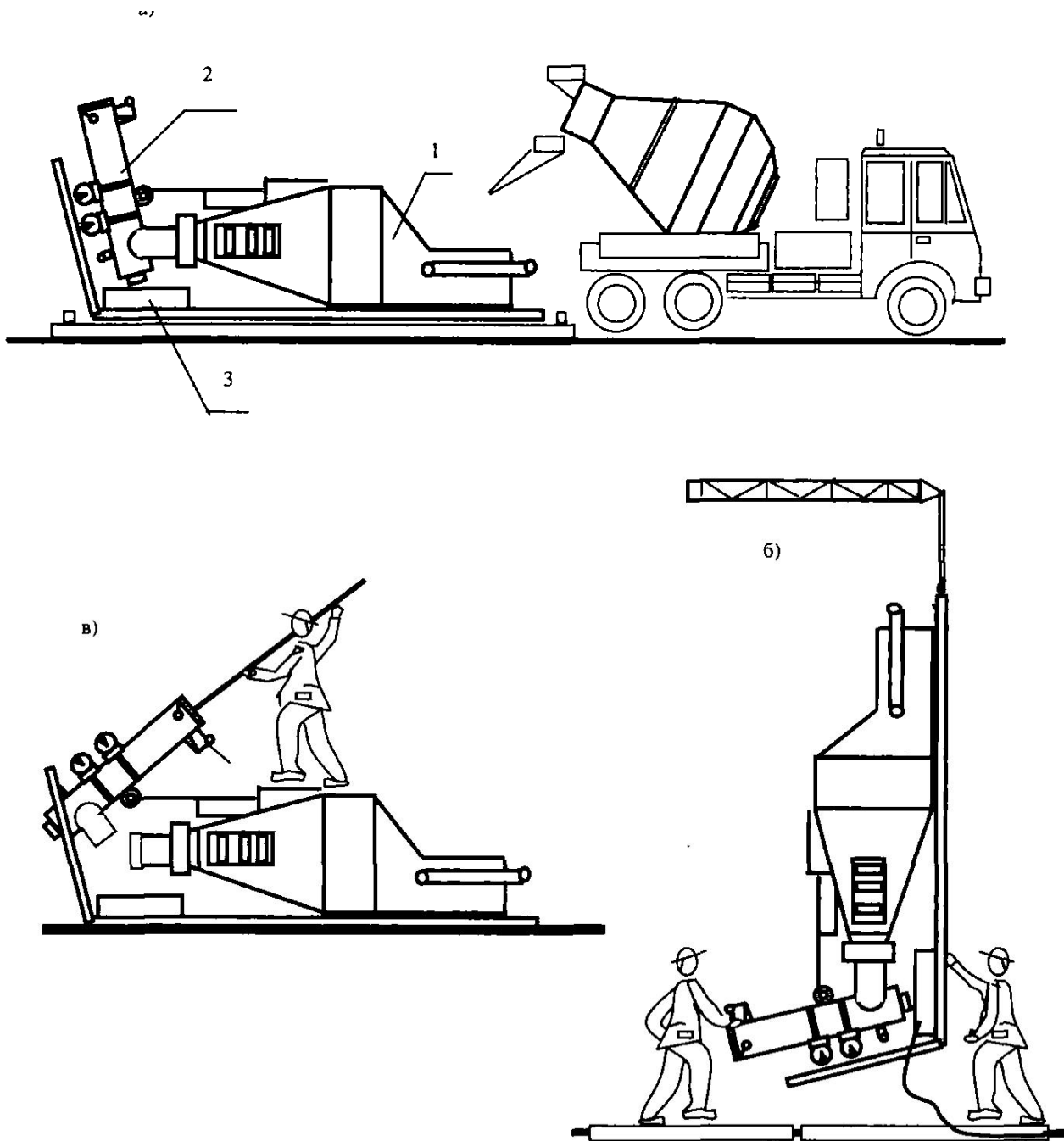


Рис. 3.6. Поворотный бункер с приставкой для термовиброобработки бетонной смеси (БП-ТВОБС) в условиях строительной площадки.

а) при загрузке бетонной смесью; б) в процессе бетонирования;
 в) при очистке термовиброоргана. 1 – загрузочный бункер; 2 - термовиброорган;
 3 - электрошкаф с пультом управления; 4- крюк крана.

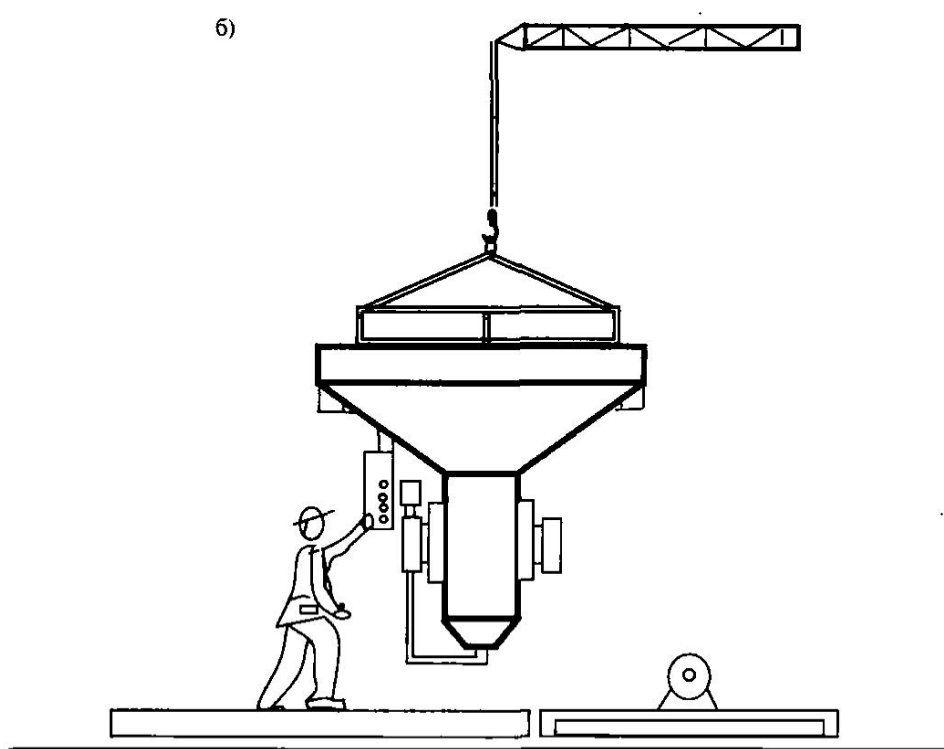
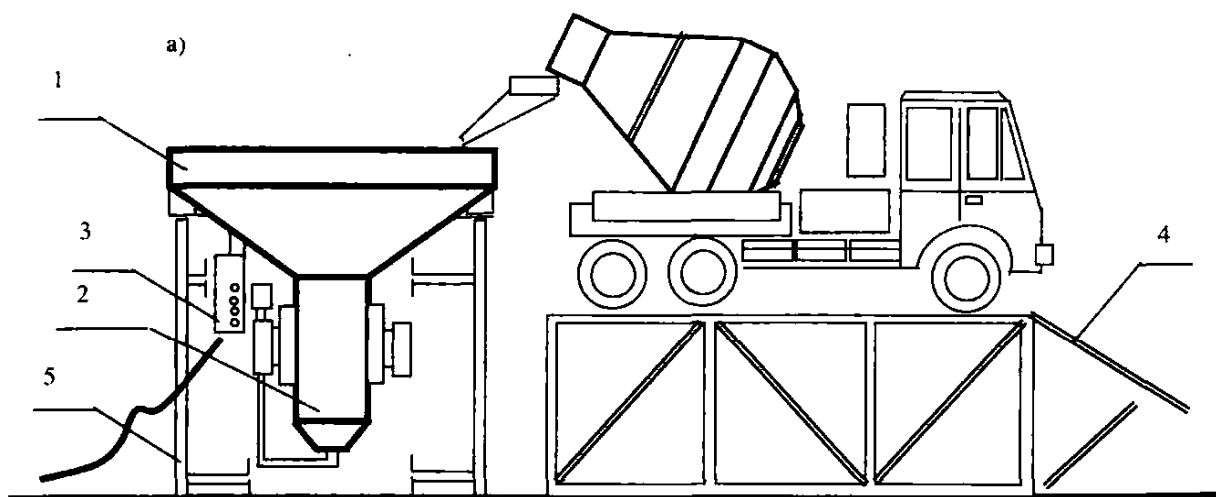


Рис. 3.7. Вариант использования установки ТВОБС в построечных условиях. а) загрузка бетонной смесью; б) процесс укладки бетонной смеси.

1 – загрузочный бункер; 2 - термовиброорган; 3 - электрошкаф с пультом управления; 4 – инвентарная эстакада; 5- инвентарная опора.

Для уменьшения высоты инвентарной эстакады возможно размещение инвентарной опоры с установкой ТВОБС в прямке.

Подключение установки ТВОБС к питающей электросети осуществляется гибким кабелем (шлейфом) с помощью инвентарного разъема.

Гибкий кабель длиной 15 – 25 м (в зависимости от размеров захватки) запитывается от электрошкафа, расположенного в центре захватки. Управление работой установки осуществляется с помощью выносного пульта, который подключен к шкафу управления установки многожильным кабелем.

При больших объемах бетонирования, в частности, при возведении линейно-протяженных, развитых в плане сооружений и устройстве фундаментов, целесообразно размещение установки ТВОБС на самоходном бетоноукладчике.

При малых объемах работ может быть реализована так называемая непрерывно-циклическая схема бетонирования. Установка ТВОБС размещается на земле в зоне действия крана. Термовиброобработка бетонной смеси осуществляется непрерывно. Из установки бетонная смесь поступает в один из трех бункеров, объемом 0,5 – 1 м³. В это время другой бункер, ранее заполненный разогретой смесью, подается к месту бетонирования. Третий бункер является запасным и используется на случай увеличения производительности процессов обработки и укладки смеси. Реализация этой схемы требует разработки пооперационного графика производства работ (рис. 3.8). Достоинства этой схемы: возможность использования крана малой грузоподъемности; стационарное размещение установки ТВОБС упрощает подвод к ней электроэнергии. Однако ей присущи серьезные недостатки: дополнительные потери тепла при двойной перегрузке разогретой бетонной смеси; опасность потери ее подвижности; появление дополнительных промежуточных операций, связанных с использованием трех типов бункеров для бетонной смеси (приемного, загрузочного и промежуточных).

При большой повторяемости отдельных конструктивных элементов, например, межкомнатных и межквартирных стен в монолитном домостроении, значительная часть этих элементов может быть изготовлена в условиях приобъектного полигона с использованием установки ТВОБС. Схема изготовления сборных элементов на полигоне, размещаемом в зоне действия монтажного крана, представлена на рис. 3.9. В этом случае одна и та же установка ТВОБС может быть использована для бетонирования монолитных конструкций при работе на крюке крана, например, в первую смену, а во вторую – для бетонирования сборных элементов при размещении установки на инвентарном самоходном портале.

При этом с наибольшей эффективностью используется большегрузные монтажные краны и наиболее целесообразно сочетаются достоинства сборного и монолитного железобетона.

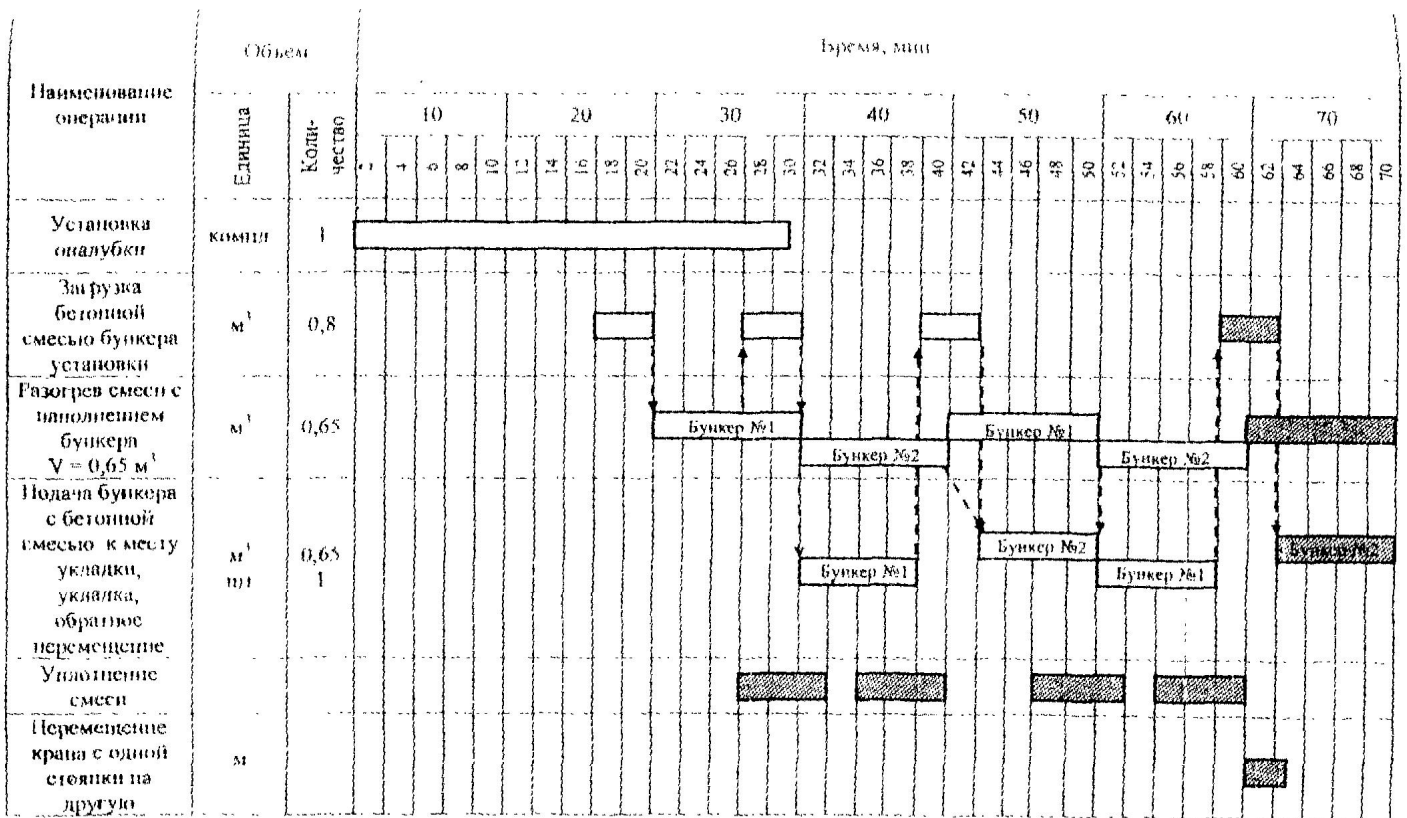


Рис. 3.8. Пооперационный график обработки и укладки бетонной смеси

§ 3-10. Бетонирование конструкций с использованием термовиброобработанных смесей.

При возведении монолитных конструкций их бетонирование в ряде случаев осуществляется послойно. В соответствии с действующими нормами укладка следующего слоя бетонной смеси допускается до начала схватывания бетона предыдущего слоя. При использовании обычных (не разогретых) смесей соблюдение этого требования затруднений не вызывает. В термовиброобработанных смесях сроки схватывания цемента существенно сокращаются. Это обстоятельство требует детальной проработки технологической последовательности послойного бетонирования конструкций с увязкой направления бетонирования каждого слоя и с установлением размеров границ захваток. Под режимом бетонирования следует понимать увязку во времени и пространстве укладки смеси в смежные слои возводимой конструкции.

Наиболее распространенной задачей, которую приходится решать на инженерном уровне с позиций рассматриваемого вопроса, является определение длины слоя бетонируемой конструкции. Решение этой задачи рассмотрим на примере возведения монолитной стены со следующими исходными данными:

v – толщина стены (толщина слоя), м;

h – высоте бетонируемого слоя, м., назначается в зависимости от типа вибратора. Например, для глубинного вибратора не должна превышать 1,25 длины его рабочей части;

P – производительность установки ТВОБС, м³/ час;

$\tau_{\text{бет}}$ – промежуток времени от момента укладки бетонной смеси в какой-либо точке нижнего слоя до момента укладки бетонной смеси над этой точкой в вышерасположенном слое. Это время равно времени бетонирования одного слоя при последовательности укладки смеси, представленной на рис. 3.10 (односторонняя схема бетонирования). При последовательности бетонирования слоев, $\tau_{\text{бет}}$ равно времени бетонирования 2-х слоев (двусторонняя схема бетонирования);

$\tau_{\text{схв}}$ – время от момента окончания термовиброобработки смеси до момента начала схватывания цемента. Определяется экспериментально в лабораторных условиях, с учетом времени от момента затворения бетонной смеси водой до начала ее термовиброобработки.

Пример: $\tau_{\text{бет}} = \tau_{\text{схв}}$

Длина бетонируемого слоя (l) при односторонней схеме укладки смеси

$$l = \frac{n \cdot \tau_{\text{схв}}}{h \cdot \%_c}, \quad \text{м} \quad (20)$$

При двусторонней схеме укладки смеси:

$$l = \frac{n \cdot \tau_{\text{схв}}}{2h \cdot \%_c}, \quad \text{м} \quad (21)$$

В процессе возведения монолитных конструкций в ряде случаев приходится прерывать бетонирование и устраивать рабочие швы. Для

предотвращения негативного влияния вибрационных воздействий на ранее уложенный бетон его прочность должна быть не менее 1,5 МПа. Время достижения этой прочности зависит от марки бетона (его класса) и температуры твердения и может быть определено через относительную прочность бетона. Так, для бетона М-300 (класс 25) и средней температуре его твердения 45 °С прочность в 1,5 МПа может достигаться через один час.

§ 3-11. Особенности расчета режима выдерживания бетона из термовиброобработанных смесей.

Под режимом выдерживания из термовиброобработанных смесей следует понимать температуру бетонной смеси к моменту его укрытия паронепроницаемой пленкой (и утеплителем), характер изменения температуры твердеющего бетона во времени и продолжительность выдерживания. Знание этих параметров режима выдерживания необходимо для определения кинетики нарастания прочности бетона.

Режим выдерживания бетона должен обеспечить требуемую прочность в заданные сроки. В основу теплотехнических расчетов, определяющих, с одной стороны, режим термовиброобработки бетонных смесей, в частности температуры разогрева, и с другой стороны – режим выдерживания, характеризующийся температурой и временем твердения бетона, положено уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{раз}} - Q_{\text{пту}} - Q_{\text{пфа}} + Q_{\text{экз}} - Q_{\text{п.выд}} = Q_{\text{ост}} \quad (22)$$

$Q_{\text{раз}}$ – количество тепла, вносимое в бетонную смесь при ее разогреве;

$Q_{\text{пту}}$ – потери тепла при транспортировании и укладке бетонной смеси;

$Q_{\text{пфа}}$ – потери тепла на нагрев форм или опалубки, арматуры разогретой бетонной смесью;

$Q_{\text{экз}}$ – тепло экзотермии цемента;

$Q_{\text{п.выд}}$ – потери тепла в окружающую среду при выдерживании бетона;

$Q_{\text{ост}}$ – остаточное количество тепла в конструкции или в изделии на момент распалубки.

Уравнение теплового баланса в представленном виде соответствует технологической последовательности процесса обработки, укладки смеси и выдерживания бетона, а также учитывает особенности приводимой ниже методики расчета отдельных составляющих теплового баланса.

Количество тепла, вносимое в бетонную смесь при ее разогреве:

$$Q_{\text{раз}} = V_{\text{бс}} C_{\text{бс}} \gamma_{\text{бс}} (t_{\text{рбс}} - t_{\text{нбс}}), \quad \text{кДж}; \quad (23)$$

где $V_{\text{бс}}$ – объем разогретой бетонной смеси, уложенной в форму, м³;

$C_{\text{бс}}$ – удельная теплоемкость бетонной смеси, кДж/(кг·°С). Применительно к тяжелым бетонам для смесей с расходом воды от 140 до 220 л/м³ $C_{\text{бс}} = 1,11$ кДж/кг·°С;

$\gamma_{\text{бс}}$ – плотность бетонной смеси, для тяжелого бетона $\gamma_{\text{бс}} = 2400$ кг/м³;

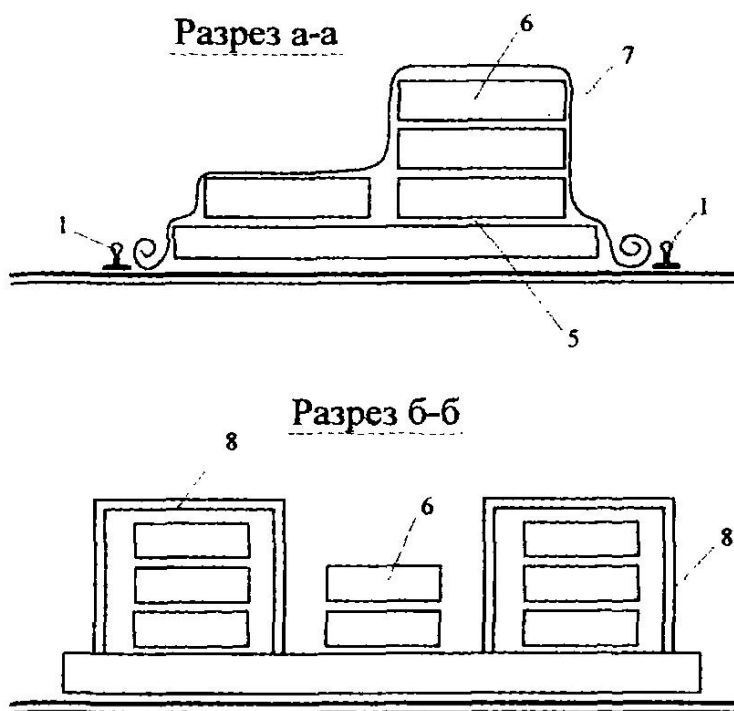
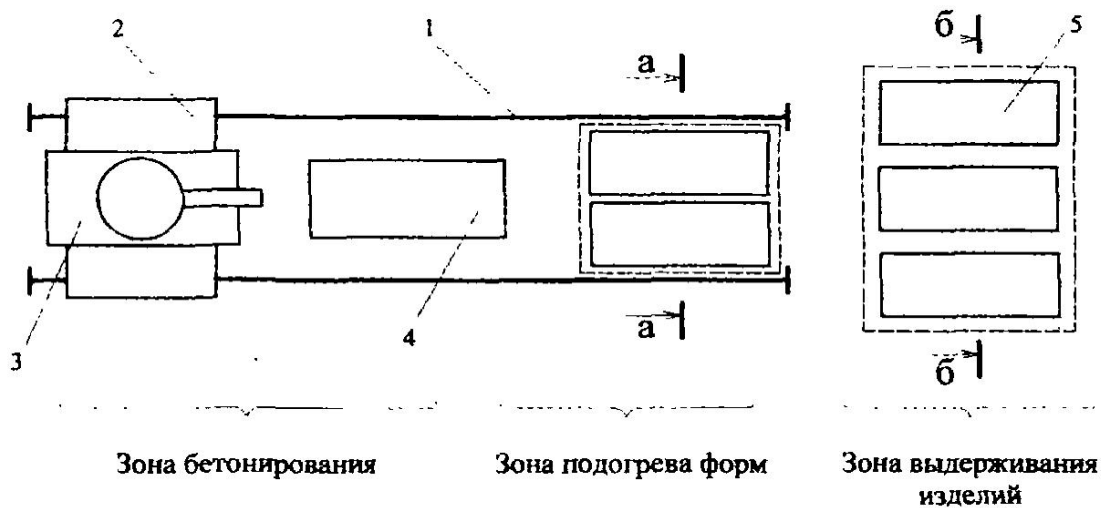


Рис. 3.9. Схема полигонного изготовления изделий при сочетании ТВОБС и термоактивного выдерживания бетона.

1 - инвентарный рельсовый путь; 2 - самоходный портал; 3 - установка ТВОБС; 4 - бетонизируемое изделие; 5 - термоактивное основание; 6 - отформованное изделие; 7 - гибкое термоукрытие; 8 - термоактивный инвентарный колпак.

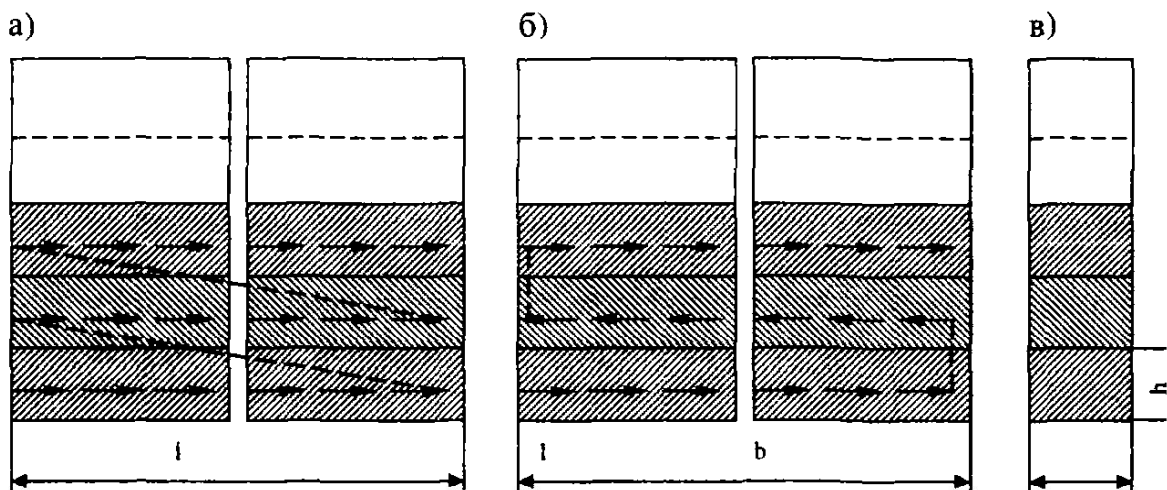


Рис. 3.10. Схемы послойного бетонирования конструкций:

а) в одном направлении; б) в двух направлениях; в) поперечный разрез.

$t_{рбс}$ – температура разогрева бетонной смеси, $^{\circ}\text{C}$. Назначается или рассчитывается в зависимости от решаемой задачи;

$t_{нбс}$ – начальная температура бетонной смеси (до разогрева), $^{\circ}\text{C}$. Принимается в зависимости от конкретных условий производства.

Количество тепла, теряемое бетонной смесью при ее транспортировании и укладке:

$$Q_{пту} = V_{бс} C_{бс} \gamma_{бс} (t_{рбс} - t_{укл}), \quad \text{кДж}; \quad (24)$$

где $t_{укл}$ – температура бетонной смеси сразу после укладки в форму $^{\circ}\text{C}$,
остальное см. выше.

Величину снижения температуры бетонной смеси при транспортировании и укладке $\Delta t_{пту} = (t_{рбс} - t_{укл})$ следует принимать равной $5 - 8^{\circ}\text{C}$.

Потери тепла на нагрев форм или опалубки и арматуры разогретой бетонной смесью:

$$Q_{пфа} = G_{ф} C_{ф} (t_{бнв} - t_{фну}), \quad \text{кДж} \quad (25)$$

где $G_{ф}$ – масса форм и арматуры, кг;

$C_{ф}$ – удельная теплоемкость материала форм. Для форм из стали $C_{ф} = 0,48 \text{ кДж/кг } ^{\circ}\text{C}$.

$t_{бнв}$ – температура смеси (и форм) к началу выдерживания бетона, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{фну}$ – температура форм (и арматуры) к моменту укладки в нее бетонной смеси, $^{\circ}\text{C}$.

В связи с тем, что нагрев форм и арматуры происходит достаточно быстро (за 5 – 15 мин) потерями тепла в окружающую среду на этом этапе пренебрегаем.

Температура смеси (и формы) к началу выдерживания бетона ($t_{бнв}$) может быть определена из равенства:

$$V_{бс} C_{бс} \gamma_{бс} (t_{укл} - t_{бнв}) = G_{ф} C_{фа} (t_{бнв} - t_{фну}), \text{ кДж} \quad (26)$$

или

$$V_{бс} C_{бс} \gamma_{бс} \cdot \Delta t_{пфа} = Q_{пфа} \quad (27)$$

При задаваемой температуре разогрева бетонной смеси ($t_{рбс}$) ее температура сразу после укладки в форму ($t_{укл}$) может быть определена по выражению:

$$t_{укл} = t_{рбс} - \Delta t_{пту}, \quad ^\circ\text{C} \quad (28)$$

Тепло экзотермии цемента может быть определено двумя способами в зависимости от решаемой задачи:

Первый способ определения:

$$Q_{экз} = V_{бс} \cdot \text{Ц} \cdot \text{Э}, \quad \text{кДж} \quad (29)$$

где Ц – расход цемента в бетоне, кг/м³;

Э – тепловыделение цемента, кДж/кг, за время твердения бетона при заданной температуре.

Этот способ может быть использован, если заданы время и температура выдерживания бетона.

Второй способ учета тепла экзотермии цемента:

$$Q_{экз} = V_{бс} C_{бс} \gamma_{бс} \cdot \Delta t_{экз}, \quad \text{кДж} \quad (30)$$

где $\Delta t_{экз}$ – повышение температуры бетонной смеси за счет экзотермии цемента, $^\circ\text{C}$. Рекомендуется принимать:

$\Delta t_{экз} = 0,4 t_{бнв}, \quad ^\circ\text{C}$, при времени выдерживания 8 часов,

$\Delta t_{экз} = 0,6 t_{бнв}, \quad ^\circ\text{C}$, при времени выдерживания 12 часов.

Остаточное количество тепла в форме и в изделии на момент его распалубки

$$Q_{ост} = (V_{бс} C_{бс} \gamma_{бс} + G_{ф} C_{ф}) t_{бкв}, \quad \text{кДж} \quad (31)$$

По численным значениям отдельных составляющих теплового баланса (23), определенным по формулам 24 – 30 и, используя выражение (31), можно определить температуру бетона изделия к концу его выдерживания:

$$t_{бкв} = \frac{Q_{рлз} - Q_{пту} - Q_{пфа} + Q_{экз} - Q_{п.выд}}{V_{бс} \gamma_{бс} C_{бс} + G_{ф} C_{ф}}, \quad ^\circ\text{C} \quad (32)$$

Для конструкций с $M_{п} = 5 \div 17 \text{ м}^3$ средняя температура бетона за время его выдерживания определяется по формуле:

$$t_{бср} = \frac{t_{бнв} + t_{бкв}}{2} \quad ^\circ\text{C} \quad (33)$$

Зная среднюю температуру твердения бетона, которую получили в результате расчета, и время выдерживания бетона при этой температуре,

которым задаемся, можно спрогнозировать относительную прочность бетона, которую он приобретает к моменту распалубки.

На основе уравнений теплового баланса могут быть решены и другие задачи. Например, задаваясь прочностью бетона к моменту распалубки и временем выдерживания конструкций, к которому бетон приобретает эту прочность, можно рассчитать требуемую температуру разогрева бетонной смеси или теплотехнические характеристики опалубки.

Пример расчета режимов термовиброобработки бетонной смеси и выдерживания бетона приведен в Приложении № 5.

§ 3-12. Техника безопасности при предварительном электроразогреве бетонной смеси.

Производство работ с предварительным электроразогревом бетонной смеси связано с применением тока высокого напряжения 220/380 В. Это требует строгого соблюдения правил техники безопасности, изложенных в СНиП Ш-4-80 "Техника безопасности в строительстве". Следует также руководствоваться правилами работы с электроустановками: ГОСТ 121.013-78 ССБТ "Строительство. Электробезопасность. Общие требования", СН 102-80 "Правила безопасности при эксплуатации электроустановок. Инструкция по устройству заземления и зануления в электроустановках", а также специальными инструкциями, разработанными для конкретных установок и прилагаемые к ним.

Все металлические части установок, находящиеся под напряжением, для электроразогрева бетонной смеси, должны быть заземлены. В установках ТВОБС эти части должны быть занулены и повторно заземлены, а электрошкаф должен быть оборудован средствами защитного отключения. Для заземления установки предусматривается соединение корпуса с гибким металлическим (медным) кабелем сечением не менее 10 мм², проложенного совместно с силовым подводным кабелем и скрепленного с ним.

При подаче напряжения на электроды и при включении вибратора на панели шкафа управления должны загораться сигнальные лампы, а вольтметры показывать величину напряжения на каждой фазе.

До начала электроразогрева следует проверять изоляцию кабелей и проводов с помощью мегометра, надежность крепления вибраторов на корпусе установки, исправность приборов защитного отключения и световой сигнализации. Необходимо также проверить отсутствие посторонних предметов в бункерах электроразогрева.

Операторы-бетонщики, работающие на установке и обслуживающие ее электрики должны быть аттестованы и иметь квалификацию не ниже 1У разряда.

При циклическом электроразогреве бетонной смеси в бункерах на специальных огороженных стендах, при включении напряжения вход людей на стенд разогрева запрещается.

Разогретая бетонная смесь может иметь температуру до 80⁰С и даже выше, поэтому работать с ней надо осторожно и исключать ее случайного попадания на открытые участки кожи человека.

При перерывах в работе рабочие органы установок и в первую очередь электроды должны тщательно очищаться от остатков бетона. Во время этой операции рубильник должен быть отключен снятием рукоятки и на электрошкаф вешается табличка: "НЕ ВКЛЮЧАТЬ! РАБОТАЮТ ЛЮДИ!".

По окончании работы установки разогрева от электросети отключаются, а электрошкаф запирается.

Категорически запрещается: оставлять под напряжением установки электроразогрева без надзора; производить очистку и ремонт установок при включенном напряжении; эксплуатировать технические неисправные установки и допускать для их обслуживания необученный и не прошедший инструктаж персонал.

Глава 4. ФОРСИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВ БЕТОНА В КОНСТРУКЦИЯХ.

§ 4-1. Сущность метода.

Электропрогрев бетона в конструкциях может осуществляться и форсированно, т.е. с разогревом только что уложенной бетонной смеси в течение 3-6 мин. до требуемой температуры (50-80⁰С). Высокая скорость разогрева бетонной смеси приводит к нарушению в ее структуре, что приведет к низкому качеству затвердевшего бетона, а следовательно и возводимой конструкции. Во избежание этого, разогретая в конструкции бетонная смесь подвергается в обязательном порядке повторному виброуплотнению до начала ее схватывания. Вибровоздействие дает возможность хорошо смесь уплотнить в горячем состоянии и ликвидировать структурные дефекты.

Такая технология обычно применяется для электропрогрева бетона в горизонтальных монолитных конструкциях типа дорожных и аэродромных покрытий, при возведении днищ каналов, полов промышленных зданий, складских площадок и других подобных конструкциях. Эта технология не имеет аналогов в мире, является отечественной разработкой и несомненно заслуживает внимания.

В настоящем "Руководстве" рассматривается устройство монолитных бетонных покрытий путем непрерывного электропрогрева бетонной смеси в конструкции.

В строительстве находят широкое применение бетонные покрытия, укладываемые на грунт или подготовленное основание. Однако, строительство их в значительной степени затруднено в зимний период. При отрицательных температурах наружного воздуха и основания трудно обеспечить длительное сохранение бетоном положительных температур, если укладываемый слой не превышает 35-40 см. Большие неопалубленные поверхности интенсивно отдают тепло в окружающее пространство и грунтовое основание, бетон быстро охлаждается до приобретения им минимально допустимой, критической прочности.

В институте НИИЖБ Госстроя РФ разработана новая технология бетонирования неармированных протяженных цементно-бетонных конструкций в зимних условиях с использованием форсированного электропрогрева бетона в начальный период. Выполненные исследования и экспериментальные проверки в производственных условиях показали, что метод форсированного электропрогрева позволяет выполнять бетонные покрытия в летних и в зимних условиях при укладке бетона даже на слегка замороженное грунтовое основание с не более, чем на 5-10 см и при отрицательных температурах наружного воздуха.

Наибольшая эффективность применения этой технологии может быть достигнута при соблюдении ряда условий, приемов и правил, инженерном расчете параметров разогрева бетона и необходимой степени утепления в зависимости от погодных-климатических условий, и организации производства работ.

Ниже приводятся рекомендации по применению новой технологии при устройстве монолитных покрытий, составленные в развитие глав

СНиП Ш-15-78, СНиП Ш-40-78 и СН 121-73, в которых приводятся данные по применению форсированного электроразогрева при бетонировании неармированных протяженных монолитных конструкций.

Технологический процесс бетонирования протяженных монолитных конструкций с применением форсированного электроразогрева включает в себя укладку на подготовленное основание бетонной смеси, разравнивание и первичное уплотнение ее, форсированный разогрев уложенной смеси до заданной температуры с помощью системы вибрируемых и перемещаемых в бетоне пластинчатых электродов, вторичное виброуплотнение разогретого бетона, отделку поверхности, укрытие ее паро- и теплоизоляцией, и выдерживание под ними до приобретения бетоном требуемой прочности.

Технологию бетонирования протяженных монолитных конструкций с форсированным электроразогревом рекомендуется применять для достижения следующих целей:

- обеспечения твердения уложенного бетона в зимнее время;
- сокращения сроков влажностного ухода за бетоном и гарантированного получения конструкций с заданными свойствами и долговечности при возведении их в сухую жаркую погоду;
- обеспечения ускоренного твердения свежесуложенного бетона в любых погодноклиматических условиях в случае необходимости сокращения сроков сдачи конструкций под нагрузку.

Использование форсированного электроразогрева бетона дает возможность ликвидировать еще сохранившуюся в дорожном и аэродромном строительстве сезонность в производстве бетонных работ, использовать единую технологическую схему бетонирования независимо от времени года в любых климатических зонах строительства.

Использование форсированного электроразогрева с помощью системы вибрируемых и перемещаемых в бетоне пластинчатых электродов наиболее предпочтительно при бетонировании протяженных монолитных конструкций бетонизирующимися комплексами, включающими бетоноукладочные и бетоноотделочные машины. При этом система электродов монтируется непосредственно на одну из этих машин.

Однако система вибрируемых и перемещаемых пластинчатых электродов может быть смонтирована и на самостоятельной ходовой базе и может использоваться при любых других способах укладки бетона (рис. 4.1).

Бетонирование протяженных монолитных конструкций с использованием форсированного электроразогрева должно осуществляться по заранее разработанному для каждого конкретного случая проекту производства работ или техническим картам.

Бетонные смеси, укладываемые в зимнее время с применением форсированного электроразогрева, по своему составу и используемым материалам должны удовлетворять требованиям, предъявляемым проектом к бетону для данных конструкций и обеспечивать необходимые формовочные свойства применительно к используемым технологическим приемам их укладки, уплотнения и отделки.

В целях обеспечения достаточного технологического времени на обработку разогретой бетонной смеси в качестве вяжущего должны использовать -

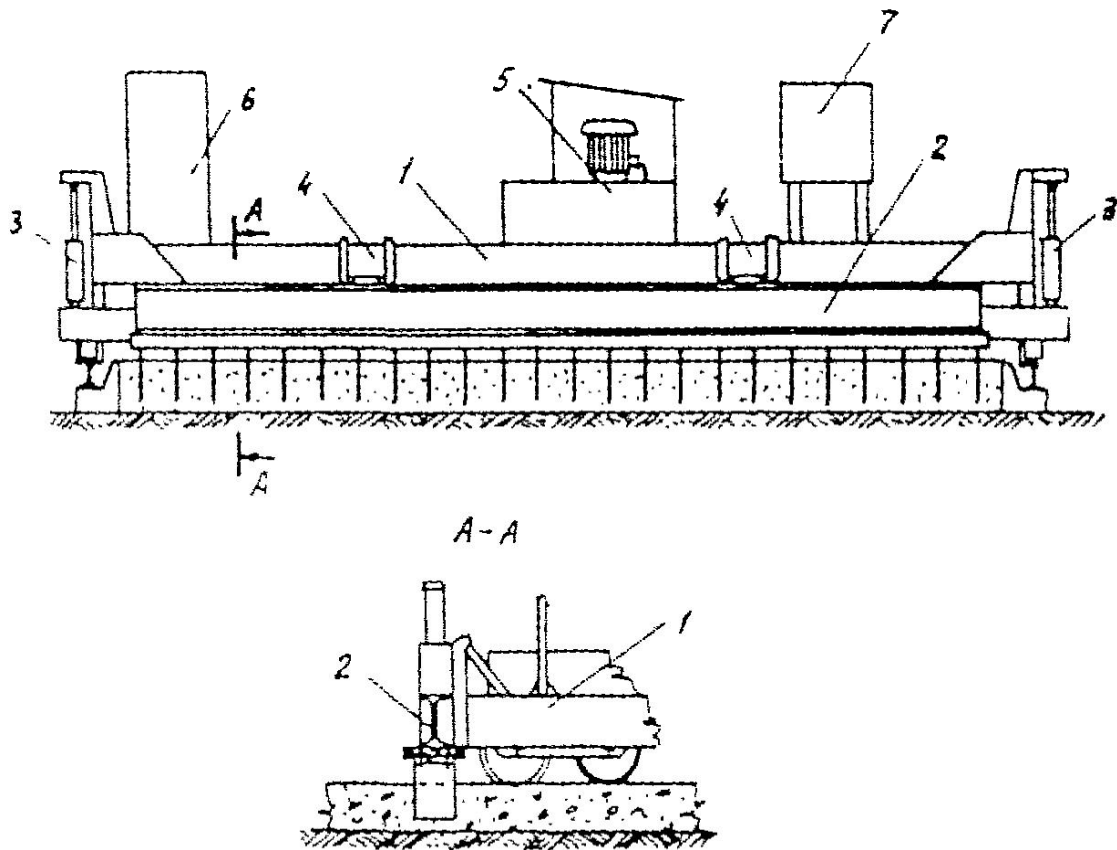


Рис. 4.1. Установка для форсированного электроразогрева.

1 - бетоно-отделочная машинна; 2 - балка с системой пластинчатых электродов; 3 - привод для подъема и опускания электродов; 4 - навесные вибраторы; 5 - маслостанция; 6 - электрошкаф; 7 - пульт управления.

ся высокоалюминатные портландцементы марок 400 и выше, предпочтительно низкоалюминатные (с содержанием C_3A не более 8), удовлетворяющие требованиям ГОСТ.

Удельное электрическое сопротивление бетонной смеси должно быть не меньше расчетной величины принятой при конструировании оборудования для электроразогрева бетона и не превышать ее более, чем на 20%. Достижение заданного значения удельного электрического сопротивления бетонной смеси, подвергаемой форсированному электроразогреву, может обеспечиваться введением химических добавок – электролитов.

Для улучшения технологических и эксплуатационных свойств бетона допускается введение в смесь различных химических добавок (пластифицирующих, воздухововлекающих и т.п.). При этом, обязательно должна быть проведена лабораторная проверка соответствия удельного электрического сопротивления бетонной смеси расчетному и интенсивности набора прочности бетона при температурном режиме его выдерживания, аналогичном расчетному в бетоне конструкции.

Приготовление и транспортирование бетонной смеси, подвергаемой форсированному электроразогреву, должно производиться с соблюдением общих требований СНиП Ш-15-76 и обеспечивать к моменту укладки температуру бетонной смеси не ниже $2^{\circ}C$.

Подготовка основания под бетонное покрытие должна осуществляться в соответствии с требованиями, указанными в приведенном выше СНиП.

Для устройства подстилающего слоя основания, особенно при наличии вечномёрзлых грунтов, рекомендуется использовать материалы, обладающие пониженной теплопроводностью, например, сухие пески, шлаки, керамзит и т.п. Влажность этих материалов должна быть не более 3-5% по массе.

В качестве материала для подстилающего слоя могут использоваться сухие (незатворенные водой) бетонные смеси. Последние служат одновременно гидро- и теплоизоляцией, в процессе бетонирования и тепловой обработки, а при последующем насыщении водой и твердении приводят к увеличению несущей способности покрытия.

Подготовленное основание до начала укладки бетона должно быть защищено от атмосферных осадков (снега, дождя и др.). В случае попадания снега на подготовленное основание, перед началом бетонирования его следует удалить.

§ 4-2. Укладка бетонной смеси и форсированный ее электроразогрев.

Укладка бетонной смеси в конструкцию осуществляется любым известным способом. Уложенная смесь сразу же подвергается форсированному электроразогреву до заданной температуры, а затем повторному вибрированию до потери разогретой смесью формовочных свойств.

В качестве исходных данных, при расчете параметров электроразогрева бетона погодные условия на планируемый период должны приниматься по СНиП П-А-6-72 "Строительная климатология" с последующей корректировкой температуры разогрева с учетом данных прогноза погоды.

Перед началом выполнения работы по электроразогреву необходимо производить контрольную предпусковую проверку систем электропитания, сигнализации, системы заземления и защитного отключения при аварийных ситуациях.

Для выполнения электроразогрева установку перемещают на участок уложенного бетона, опускают систему электродов в бетон на необходимую глубину и подают напряжение на электроды. Электроразогрев бетона производят при непрерывном перемещении установки вдоль уложенной полосы со скоростью, устанавливаемой в зависимости от необходимой степени разогрева.

При производстве электроразогрева обслуживающий персонал обязан соблюдать правила техники безопасности от поражения электрическим током, изложенные в ниже приведенном разделе настоящих Рекомендаций.

После выполнения электроразогрева бетон должен быть немедленно подвергнут окончательному виброуплотнению, при необходимости в конструкцию должны быть уложены закладные элементы и разделительные перегородки деформационных швов, произведено заглаживание поверхности.

Виброуплотнение смеси после разогрева является обязательным элементом технологии. При быстром разогреве в бетоне возникают структурные дефекты в результате температурных расширений составляющих компонентов – вяжущего, заполнителей, воды и вовлеченного воздуха, из-за повышенных термоградиентов интенсифицируется явление массопереноса, прохождение пластинчатых электродов вызывает смещение крупного заполнителя. Интенсивное окончательное виброуплотнение ликвидирует последствия отмеченных деструктивных явлений.

Общая продолжительность выполнения операций с разогревом бетона до укрытия паро- и теплоизоляцией должна быть минимальной, определяемой проектом производства работ, но не более 30 мин. Степень начального разогрева бетона должна приниматься с учетом теплотерь бетона в период выполнения этих операций.

§ 4-3. Выдерживание бетона в конструкциях и контроль за температурным режимом твердения.

Сразу же после выполнения указанных операций, конструкция должна быть накрыта паро- и теплоизоляцией. В качестве пароизоляции рекомендуется использование пленкообразующих составов, пергамина или полиэтиленовой пленки. В качестве теплоизоляции могут быть использованы любые теплоизоляционные материалы.

Термическое сопротивление верхней теплоизоляции должно назначаться из условия обеспечения требуемых режимов выдерживания в зависимости от условий производства работ, степени разогрева бетона и содержания в нем цемента.

После укладки теплоизоляции должно быть выполнено измерение начальной температуры бетона. Для этого в конструкцию должны быть заложены термометры или устроены гнезда для измерения температуры ртутными термометрами. Расположение точек измерения температур в конструкции по

сечению и в плане должно определяться проектом производства работ и составлять не менее 3 точек на каждую захватку, но не более, чем на 100 м² покрытия. Расположение точек по сечению – одна в 1 см от границы примыкания слоя бетона к основанию, одна в середине конструкции и одна в 1 см от верхней поверхности бетона.

Последующее измерение температур должно производиться в тех же точках через интервалы времени, определяемые проектом производства работ, но не более, чем через 6 часов в первые сутки выдерживания, 12 часов во вторые сутки выдерживания и через 24 часа в последующее время до полного остывания конструкции. Данные измерений должны вноситься в журнал наблюдений.

В течение первых 2-х суток должен быть определен фактический показатель интенсивности остывания конструкций (время остывания до температуры равной 0,37 t_{б.н.}). В случае отклонения его в меньшую сторону по сравнению с расчетным, должна быть определена ожидаемая к концу выдерживания прочность бетона. Если величина ее будет недостаточной, то должны быть приняты меры по дополнительному утеплению конструкций.

Для контроля качества поступающего бетона необходимо не ранее одного раза в каждую рабочую смену отбирать пробы бетона, состоящие из двух контрольных серий образцов: для испытания бетона после его твердения в нормальных условиях в течение 1 суток – для экспериментального определения группы бетона и 28 суток – для определения марочной прочности бетона.

Контроль прочностных характеристик бетона в конструкции должен выполняться, как правило, неразрушающими ультразвуковыми методами или склерометрическими методами по ГОСТ 22690-88, ГОСТ 17624-87, Методические рекомендации НИИЖБ МДС 62.2.01.

Неразрушающему контролю должен подвергаться бетон не менее, чем в 3 местах на участке каждой захватки, но не более, чем на 100 м². Контроль должен производиться в конце срока выдерживания, а также в возрасте 28 суток или ином, указанном в технических условиях или проектной документации на данную конструкцию. Возможно проведение дополнительных неразрушающих испытаний в промежуточные сроки в период выдерживания конструкции.

Контроль качества бетона в конструкции на различные эксплуатационные воздействия, водонепроницаемость, морозостойкость и др., должен производиться путем высверливания образцов-цилиндров (кернов). Количество и периодичность проведения этих испытаний определяется проектной документацией на данный вид конструкций.

§ 4-4. Расчет конструктивных параметров и режимов эксплуатации оборудования.

Обеспечение стабильных режимов процесса разогрева и получение на выходе необходимой конечной температуры бетона может быть достигнуто при правильном расчете конструктивных параметров оборудования и выборе оптимальных режимов его загрузки в работе.

При проектировании установки для разогрева задаются исходные данные:

h – толщина слоя бетона, (см);

A – ширина прогреваемой полосы, (см);

P – электрическая мощность питающего трансформатора или подстанции, (кВт);

U – напряжение тока, подводимого к электродам, (в).

Должны быть известны характеристики бетонной смеси:

γ – объемная масса ($\text{кг}/\text{м}^3$);

B – содержание воды в смеси ($\text{кг}/\text{м}^3$);

ρ – удельное электрическое сопротивление (Ом·см).

Ввиду того, что состав бетонной смеси и ее свойства могут колебаться в каких-то пределах, удельное сопротивление ее, оказывающее наиболее существенное влияние на скорость разогрева, должно определяться для каждого конкретного бетона с учетом возможных колебаний (от ρ_{\min} до ρ_{\max}) в разогретом до температуры 55-65⁰С состоянии. Данные по объемной массе и содержанию воды в смеси могут быть приняты усредненные для заданного вида бетона.

Количеством электродов в установке (n) и расстоянием между ними (b) задаются из конструктивных соображений. При этом расстояние между электродами должно приниматься в 3-4 раза больше диаметра наиболее крупного заполнителя в бетоне. Для равномерной загрузки трансформатора по фазам желательно количество электродов принимать кратным 3 (количеству фаз). Высоту электродов принимают не менее возможной толщины слоя бетона.

Длину электродов (L) определяют из условия полной загрузки питающего трансформатора при меньшем удельном сопротивлении смеси:

$$L = \frac{\rho_{\min} b P}{n U^2 h} \text{ см} \quad (1)$$

Для обеспечения стабильности заданной конечной температуры разогрева при возможном колебании электропроводности смеси осуществляют регулирование процесса скоростью перемещения установки. При конструировании установки должен быть заложен привод с изменяемой в определенных пределах скоростью.

Максимальную скорость установки определяют из расчета минимально необходимого подъема температуры в бетоне ($\Delta t = t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}$):

$$V_{\max} = \frac{P 10^4}{q A h \Delta t} \text{ м}^3/\text{ч} \quad (2)$$

Минимальную скорость перемещения установки определяют из расчета возможности разогрева бетона с наибольшим удельным сопротивлением с максимально необходимым подъемом температуры:

$$V_{\min} = V_{\max} \frac{\rho_{\min} \Delta t_{\min}}{\rho_{\max} \Delta t_{\max}} \text{ м}^3/\text{ч} \quad (3)$$

После определения величин скоростей проверяют продолжительность нахождения смеси между электродами, т.е. время ее разогрева:

$$Z_{\min} = 0,6 \frac{L}{V_{\max}} \text{ мин.} \quad (4)$$

$$Z_{\max} = 0,6 \frac{L}{V_{\min}} \text{ мин.} \quad (5)$$

Минимальное время разогрева зависит от вида и крупности заполнителей (для обычного бетона при заполнителе крупностью 10 мм принимают не менее 2 мин.). Максимальное время ограничено сроками схватывания бетона (~15 мин.). В случае, если рассчитанные параметры установки не удовлетворяют этим условиям, необходимо повторить расчет, изменив расстояние между электродами.

При работе установки скорость перемещения ее изменяют в зависимости от удельного сопротивления бетона и интенсивности протекания процесса разогрева в бетоне. Контроль степени разогрева при настройке системы осуществляют непосредственным измерением температуры бетона. В период работы машинист установки может следить за интенсивностью процесса разогрева по потребляемому установкой электрическому току. Для этого в каждую фазу питания включают прибор измерения силы тока (амперметр). При увеличении силы тока повышается интенсивность прогрева, для обеспечения заданной температуры на выходе необходимо увеличить скорость движения установки, определяя ее по формуле:

$$V = \frac{K_1 \cdot I}{\Delta t} \quad (6)$$

где коэффициент K_1 определяют заранее ($K_1 = \frac{10^4 U \sqrt{3}}{qAh}$) для каждой установки.

Контроль по силе тока удовлетворителен при относительно стабильном питании. При использовании питания передвижной электростанции возможны более существенные колебания напряжения. В этом случае контроль за интенсивностью процесса выполняется по потребляемой электрической мощности, а скорость перемещения определяют по формуле:

$$V = \frac{K_2 \cdot P}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\text{где } K_2 = \frac{10^4}{qAh} .$$

Пример расчета. Дано: $h = 20$ см, $A = 375$ см, $P = 600000$ Вт, $U = 380$ В, $\gamma = 2300$ кг/м³, $B = 170$ кг/м³, $\rho_{\min} = 400$ Ом.см, $\rho_{\max} = 1000$ Ом.см, $\Delta t_{\min} = 50^\circ\text{C}$, $\Delta t_{\max} = 80^\circ\text{C}$.

Задаемся количеством электродов и расстоянием между ними:

$n = 15, b = 25$ см. Определяем:

- длину электродов $L = 0,8 \frac{400 \cdot 25 \cdot 600000}{20 \cdot 380^2 \cdot 15} = 110 \text{ см}$

- удельные энергозатраты $q = 1,15 (0,23 \cdot 2300 + 0,93 \cdot 170) = 787 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3 \text{ град}$

- максимальную скорость перемещения установки

$$V_{\max} = \frac{1000 \cdot 600000}{787 \cdot 375 \cdot 20 \cdot 50} = 20,3 \text{ м/час}$$

- минимальную скорость перемещения установки

$$V_{\min} = 20,3 \frac{400 \cdot 50}{1000 \cdot 80} = 5,0 \text{ м/час}$$

Проверяем время разогрева: $Z_{\min} = 0,6 \frac{110}{20,3} = 3,2 \text{ мин}$

$$Z_{\max} = 0,6 \frac{110}{5,0} = 13,1 \text{ мин}$$

Определяем коэффициент $K_1 = 10^4 \cdot \frac{380 \cdot 3}{787 \cdot 375 \cdot 20} = 1,27$.

Следует заметить, что при времени разогрева 3,2 мин. разогреется только цементное тесто, песок и жидкая фаза. Крупный заполнитель нагревается кондуктивно от них и в указанное время полностью крупные зерна заполнителя могут не разогреться. Вследствие этого температура разогрева может несколько снизиться.

Необходимо отметить, что степень использования мощности питающего трансформатора зависит от точности определения принятой в расчете величины удельного сопротивления бетонной смеси. Перестраховка в определении может привести к низкому использованию мощности при разогреве бетона с большим удельным сопротивлением. Схема питания установки должна обеспечивать отключение трансформатора при нарушениях в подводящих цепях или перегрузке.

§ 4-5. Назначение температуры разогрева бетона и необходимой теплоизоляции

Назначение температуры разогрева бетона, толщины подстилающего основания и верхней теплоизоляции производят в зависимости от требуемой прочности бетона к концу периода выдерживания, толщины бетонируемой конструкции, внешних погодных условий на открытой площадке, или температуры не отапливаемого помещения, а также характеристик грунтового основания.

Сначала принимают ориентировочно начальную температуру бетона после укрытия его поверхностей теплоизоляцией. Зная требуемую к концу выдерживания прочность бетона в % от R_{28} и группу (табл.4.1), определяют приведенный возраст бетона или его данную прочность.

Затем, зная группу используемого цемента (табл.4.2), определяют необходимую продолжительность остывания конструкции до температуры $0,37 t_{б.н.}$ (показатель интенсивности остывания конструкции γ) по формуле:

$$r = \frac{N_{пр}}{2,4 + 0,04(t_{б.н} - 40)(n - 1,1)} \quad (8)$$

где $N_{пр}$ – приведенный возраст бетона, сут.;

$t_{б.н.}$ – начальная температура в слое бетона (средняя) после укрытия его теплоизоляцией, °С;

n – показатель скорости гидратации цемента, принимаемый по табл. 4.1.

В ориентировочных расчетах общую продолжительность остывания конструкции Z_0 допустимо принимать равной $3r$.

Для обеспечения необходимого показателя интенсивности остывания бетона необходимо определить требуемое термическое сопротивление подстилающего основания (R_0) и верхнего утеплителя (R_y) в зависимости от принятой первоначальной температуры бетона, температуры наружного воздуха, температуры и влажности грунта и содержания цемента в бетоне.

После определения термического сопротивления теплоизоляции определяют величину ожидаемой общей продолжительности остывания бетона до 0°С в период выдерживания для таких внешних условий.

Таблица 4.1

Виды цемента

Группа Цемента	Вид цемента	Основная марка Цемента	Показатель скорости гидратации вяжущего (в)
1.	Высокоалитловые низкоалюминатные портландцементы без кремнеземистых добавок, включая БТЦ	500 и более	2,0
2.	Среднеалюминатные портландцементы без кремнеземистых добавок	400-500	2,15
3.	Портландцементы с кремнеземистыми добавками до 10%	400	2,4
4.	То же, с добавками до 15%	300	2,9
5.	Шлакопортландцементы, включая БТМЦ	300-400	3,4
6.	Пуццолановые портландцементы	300	3,6

Таблица 4.2

Виды бетона

Группа цемента	Вид бетона	Марка бетона	Суточная прочность % от R ₂₈	В/Ц
1.	Бетон на высокопрочном портландцементе марки 600, бетон на ОБТЦ	400-600	36-45	0,3-0,45
2.	Бетон на портландцементе марки 500, бетон на БТЦЩЦ	100-400	35	0,36-0,5
3.	Бетон на портландцементе марки 400, с добавками до 10%, бетон БТЦЩЦ	200-300	21-27	0,45-0,65
4.	Бетон на портландцементе марки 300-400, с добавками до 15%, бетон на ЩЦЦ	200-300	13-20	0,5-0,7
5.	Бетон на портландцементе марки и ниже с добавками, бетон на ЩЦЦ	100-200	6-12	0,55-0,75
6.	Бетон на пуццолановых и низкорочных портландцементях и бетонных пластичных смесей	500-200	Менее 6	0,6-0,8

Затем уточняют ожидаемую прочность бетона, по данным полученного показателя интенсивности и общей продолжительности остывания конструкции.

Если прочность получилась недостаточной, производят повторный расчет, увеличивая начальную температуру бетона или величину верхней и нижней теплоизоляции.

Для повышения точности определения ожидаемой прочности бетона группу бетона можно определять экспериментально путем испытания бетона в суточном возрасте нормального хранения. В зависимости от суточной прочности по таблице 12, уточняют группу бетона.

§ 4-6. Техника безопасности при форсированном электроразогреве бетона в конструкциях.

Особенность и специфичность эксплуатации устройства в сложных условиях строительной площадки предъявляют повышенные требования к обеспечению электробезопасности работ при электроразогреве бетонной смеси в конструкции. В процессе электроразогрева свежеложенного бетона имеет место вынос напряжения за пределы электродной зоны. Однако, проведенными исследованиями установлено, что без нарушения защитного заземления (зануления) рельс-форм и корпуса установки, зона опасных напряжений за пределами контуров электродов не распространяется далее 3-х расстояний между электродами (50-60 см).

Ситуация, связанная с обрывом заземляющего провода, представляет в данном случае серьезную опасность. При этом, не только рельс-формы, но и свежеложенный бетон является проводником электрического тока и находит-

ся под напряжением, опасным для человека. Это опасное напряжение может быть вынесено на значительное расстояние от места электроразогрева.

С целью повышения надежности защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током при электроразогреве бетонной смеси, в принципиальной электрической схеме устройства должно быть предусмотрено автоматическое отключение электроразогрева при аварийных ситуациях, вызванных обрывом защитного заземления (зануления) или одной из фаз питания установки.

При эксплуатации устройства необходимо соблюдать следующие меры техники безопасности:

- не допускается производить электроразогрев свежесушеного бетона без защитного заземления (зануления) корпуса всей установки и токопроводящей опалубки (рельс-форм) согласно "Правил устройства электроустановок" (ПУЭ);
- к работе по электроразогреву бетона допускаются лица, прошедшие производственное обучение и инструктаж по технике безопасности.

Реле напряжения, обеспечивающие аварийное отключение электроразогрева, должны быть настроены на минимальную величину напряжения срабатывания. Перед началом работы устройства необходимо произвести проверку срабатывания аварийного отключения электроразогрева нажатием кнопок «Контроль аварийного отключения».

При срабатывании аварийного отключения электроразогрева необходимо поворотом ручки пакетного выключателя выключить цепь управления, извлечь электроды из бетонной смеси и принять меры по проверке и восстановлению цепи защитного заземления (зануления) и цепей питания установки.

Участок, на котором производятся работы по электроразогреву бетонной смеси, должен быть обнесен легким переносным ограждением с вывешенными предупредительными и запрещающими плакатами. При выполнении работ по укладке бетонной смеси, ее разравниванию, уплотнению и т.п. в пределах огороженного участка - электроразогрев должен быть отключен.

При производстве работ по электроразогреву бетонной смеси запрещается включать установку:

- лицам, не прошедшим производственное обучение и инструктаж по технике безопасности;
- при неисправном защитном заземлении (занулении) всей установки и рельс-форм;
- без ограждения участка, подлежащего электроразогреву, и отсутствия предупреждающих и запрещающих плакатов;
- при ручной раскладке бетонной смеси вблизи зоны электродов;
- при нахождении работающих в зоне электродов.

Должны соблюдаться правила по обеспечению безопасности работ, регламентируемые действующими ПУЭ и требованиями безопасного обслуживания строительных и дорожных машин.

Глава 5. ПРОГРЕВ БЕТОНА ГРЕЮЩИМИ ИЗОЛИРОВАННЫМИ ПРОВОДАМИ.

§ 5-1. Сущность метода и область применения

Среди методов обогрева бетона греющий провод занимает особое положение. Если при всех обогревных методах тепло от источника тепловыделения подводится к забетонированной конструкции извне и осуществляет нагрев с поверхности с постепенным распространением тепла во внутренние слои бетона, то прогрев греющим проводом происходит кондуктивно изнутри конструкции, поскольку источник тепловыделения – провод, находится непосредственно в ней. В этом большое преимущество метода, поскольку все тепло, выделяемое нагревателем передается бетону.

Для прогрева бетона в конструкциях применяются специально выпускаемые для этой цели нагревательные провода марки ПНСВ с жилой из стальной проволоки сечением 1,2 и 1,4 мм² в пластиковой изоляции. Могут также использоваться аналогичные по конструкции трансляционные провода марок ПВЖ, ППЖ, ПРСП или какие-либо другие нагревательные провода, выпускаемые промышленностью. Перед применением следует проверить сопротивление проводов, чтобы определить на отрезки какой длины их резать для обеспечения требуемой температуры прогрева (необходимой мощности).

В качестве греющих изолированных проводов, могут использоваться неметаллические полимерные провода*. Уникальность и новизна таких проводов состоит в том, что используемая в них токопроводящая жила на композиционной основе, состоящая из сотен тончайших полимерно-композиционных волокон, обработанных по специальной технологии, обеспечивает более интенсивный нагрев провода в сравнении с металлическими аналогами. Суть заключается в сгруппированности этих волокон в пучок, в котором при прохождении тока они помимо частного нагрева способствуют внутреннему нагреву волокон в пучке друг от друга, создавая более высокую концентрацию тепловой энергии. Все это в итоге обеспечивает снижение расхода энергии на обогрев.

Токопроводящая жила из полимерного композита закатывается в специальное полимерное покрытие с термостойкостью до 130⁰С, превращаясь по форме в электропровод диаметром от 3 до 6 мм, с электросопротивлением от 20 до 120 Ом/м и электрической мощностью от 8,0 до 20 Вт/м.

Провод обладает высокой гибкостью и коррозионной стойкостью. Вес от 10 до 60 гр/м, может эксплуатироваться при температуре до -50⁰С, подключаться к переменному или постоянному току напряжением от 12 до 220В.

Электроподключение греющих проводов при открытом использовании следует осуществлять через понижающие трансформаторы со ступенями пониженного напряжения от 40 до 127 В, что позволяет регулировать тепловую мощность проводов при изменении температуры среды.

*) Разработаны в НИЛ "Информатики и технологии строительства" Белорусской государственной политехнической академии под руководством проф. Лысова В.П.

Учитывая надежность изоляционного покрытия проводов, допускается при использовании стандартных устройств электроподключения и автоматизации обогрева, применение напряжений 110-220В. В открытом виде полимерный провод эффективно может применяться для прогрева бетона в тонкостенных конструкциях перегородок, стяжек в кровлях и полах.

Греющие провода с любой жилой подключаются к электрической сети с напряжением до 220 В и работают как нагреватели сопротивления. Для питания нагревательных проводов используются специальные понижающие масляные трансформаторы типа ТМОА-50, трансформаторные подстанции на их базе (типа КТП-63-ОБ) или автоматизированные трансформаторные подстанции типа КТПО 80-86/VI на базе ТМТО-80/0,38-VI, имеющие несколько ступеней понижающего напряжения, что дает возможность регулировать в широком диапазоне тепловую мощность проводов при изменении температуры наружного воздуха.

Греющий провод очень удобен для прогрева бетона в любых конструкциях независимо от характера их армирования и конфигурации. Он нашел широкое применение при возведении монолитных многоэтажных жилых зданий, в которых прогреваются перекрытия, колонны и др. конструкции.

Он начал применяться для обогрева бетона стыков, швов и заделок; при отогреве ранее забетонированных конструкций на контакте с вновь укладываемым бетоном; при обогреве раствора в заицецированных каналообразователях после натяжения арматурных канатов. Обогрев греющими проводами монолитных конструкций и омоноличиваемых стыков и швов может быть совмещен с другими способами обеспечения требуемой температуры твердения бетона: термоактивные опалубки, термоактивные гибкие покрытия, воздушный прогрев тепловыми генераторами.

Накопленный опыт позволяет высоко оценить прогрев бетона греющими проводами. При правильном их применении представляется возможным получать высококачественные бетонные и железобетонные конструкции, возводимые в любых температурных условиях наружного воздуха.

§ 5-2. Технологи́я производства работ.

Потребное количество греющих проводов назначается на основании теплотехнического расчета, в результате которого определяется мощность, обеспечивающая нагрев бетона до требуемой температуры с учетом нагрева опалубки, тепловых потерь в окружающую среду и собственного тепловыделения бетона.

Шаг расстановки греющих проводов определяются по формуле:

$$s = \frac{1}{\frac{P_{уд}}{p} + 1}, \quad (1)$$

где $P_{уд}$ – удельная требуемая мощность, Вт/м²;
 p – погонная нагрузка на провод, Вт/м.

В монолитных железобетонных конструкциях шаг греющих проводов должен находиться в пределах 50...150 мм. В стыках сборных железобетон-

ных элементов и заделках шаг греющих проводов принимается равным 30-70мм.

При электрическом расчете греющих проводов необходимо учитывать, что максимальная погонная нагрузка на провод не должна превышать 45-50 Вт/м. При большей нагрузке возможен местный перегрев бетона и возникновения в нем структурных нарушений (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Максимальная температура нагрева провода в бетоне в зависимости от погонной нагрузки

Погонная нагрузка на провод, Вт/м	Температура нагрева провода, °С
10	50
15	65
20	75
25	85
30	92
35	98
40	103
50	112

При использовании провода со стальной оцинкованной жилой электрические параметры можно определять по номограмме (рис.5.1), а при использовании греющего провода с полимерной жилой – по номограмме (рис.5.2).

По номограмме определяют:

- длину единичного проволочного нагревателя и напряжение питания в зависимости от габаритов конструкции и допускаемой погонной нагрузки на нагреватель;
- мощность одного нагревателя при найденной длине и нагрузке, а по потребной площади обогрева находят общее число нагревателей и суммарную требуемую установленную мощность;
- по определенной суммарной мощности подбирают тип и количество трансформаторов.

Основными требованиями для обеспечения нормального обогрева с помощью закладываемых в бетон нагревательных проводов являются предотвращение механических повреждений изоляции при установке и креплении проводов, монтаже опалубки и укладке бетонной смеси, а также недопущение возможности коротких замыканий токонесущей жилы со стальной арматурой, металлической опалубкой и другими металлическими элементами при выборе схем установки провода, которые могут иметь место при подаче на нагреватели напряжения электрического тока.

Нагревательные провода перед установкой в конструкции режут на пряди расчетной длины. Установка их осуществляется после монтажа арматуры или части ее (в зависимости от возводимой конструкции). В монолитных колоннах и стенах обычно применяют вертикальную установку прядей путем навивки на каркасы или размещением в виде параллельных струн на высоту бетонируемой части конструкции (рис. 5.3). Для обогрева ранее забетонированных конструкций греющие провода устанавливаются в верхней части монолитной подготовки, фундаментов, подколонников и т.п.

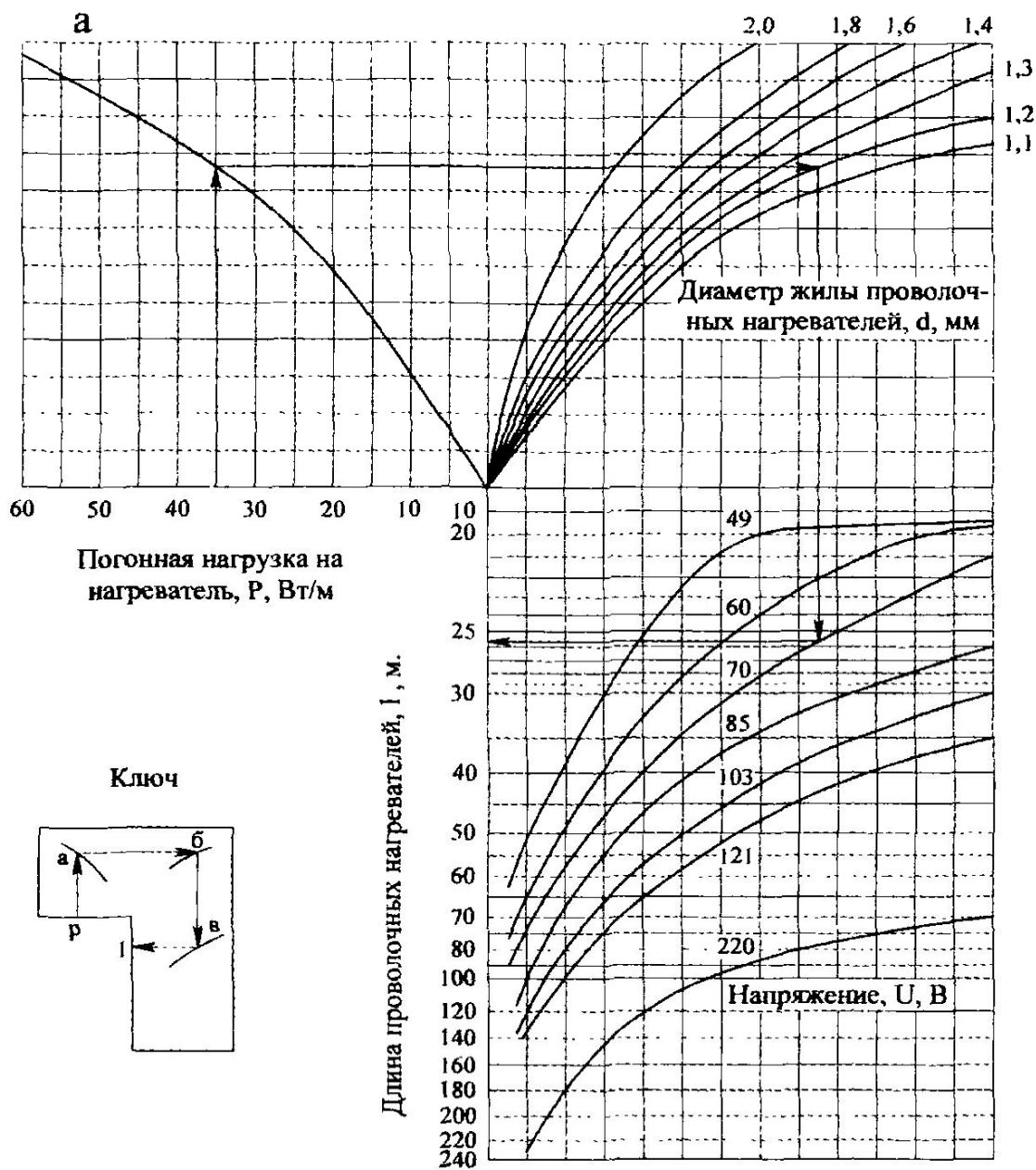


Рис. 5.1. Номограмма для определения параметров работы греющих проводов со стальной оцинкованной жилой.

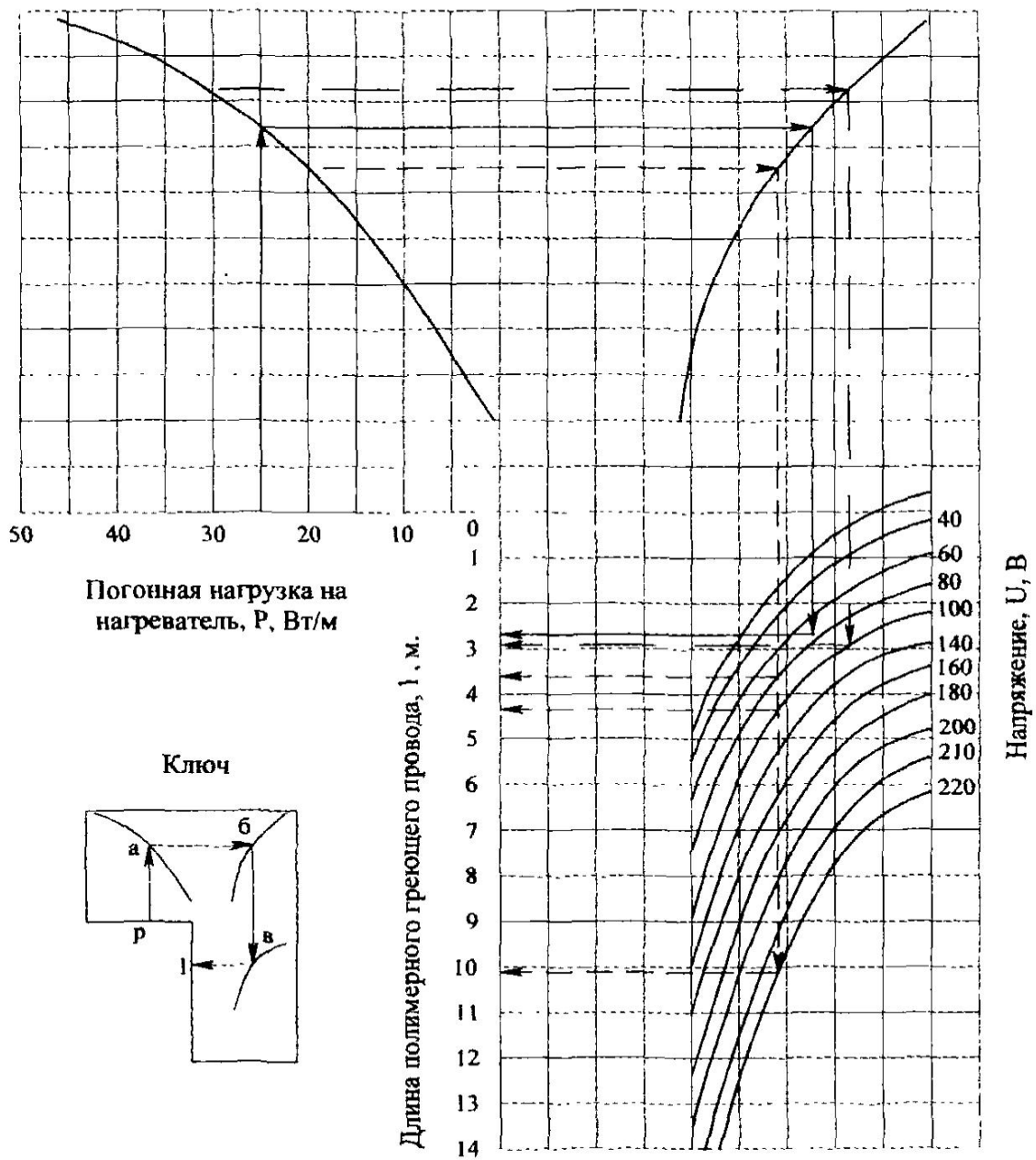


Рис. 5.2. Номограмма для определения параметров работы греющих проводов с полимерной токопроводящей жилой.

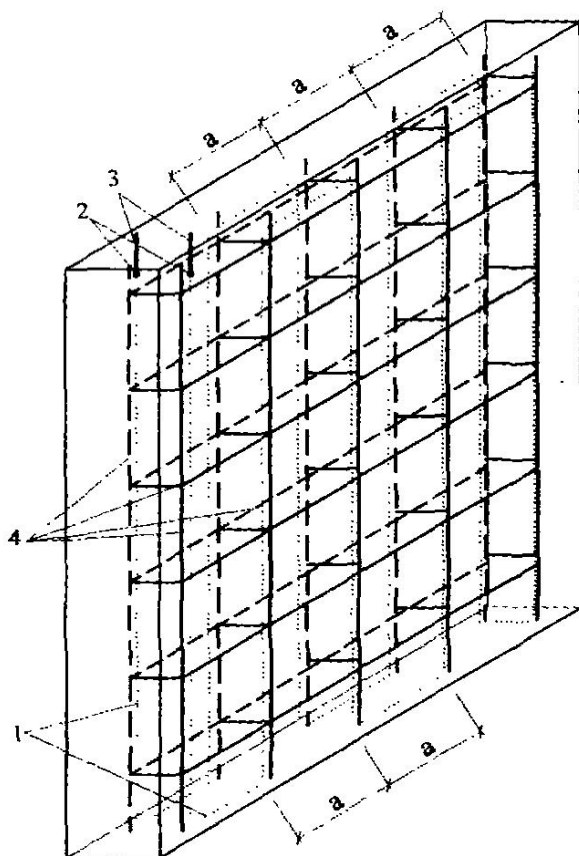


Рис. 5.3. Схема раскладки греющего провода при возведении стены.

1 - греющий провод; 2 - соединение греющего провода с коммутационным; 3 - коммутационные провода; 4 - арматура; а - шаг между ветвями греющего провода.

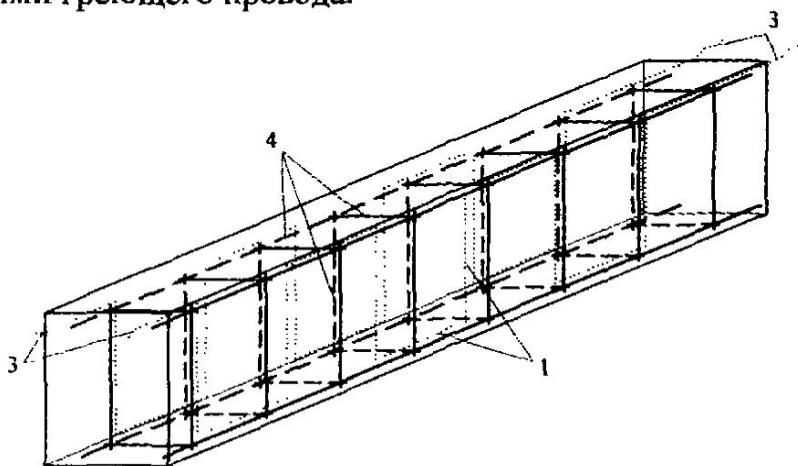


Рис. 5.4. Схема раскладки греющего провода в балке.

1 - арматурный каркас; 2 - греющий провод, установленный по сторонам каркаса; 3 - выпуски греющего провода для подключения к коммутационным проводам

В монолитных перекрытиях толщиной до 15 см греющий провод устанавливается на нижнюю арматурную сетку. При большей толщине перекрытия провод устанавливается по нижней и верхней сеткам. Направления расположения прикрепляемых к арматурным сеткам прядей может быть разное.

В монолитных балках греющий провод располагается по боковым элементам арматурных каркасов (рис. 5.4).

Провод при установке крепится снаружи к арматурным каркасам или к арматурным сеткам так, чтобы он располагался в наиболее защищенной от механических повреждений зоне при бетонировании, т.е. между арматурой и опалубкой.

Крепление проволочного нагревателя к арматуре производится без сильного натяжения (с усилием до 3-5 кг) мягкой вязальной проволокой диаметром не менее 1,2 мм, отрезками изолированного провода, полипропиленовым шпагатом. При этом строго соблюдается целостность изоляции и не смещаемость при укладке бетонной смеси и ее виброуплотнении. При установке в углах конструкции с режущими кромками под провод укладывается дополнительная электроизоляция (пластмассовый кембрик, пластмассовые фиксаторы и т.п.).

Во избежание расплавления и обгорания изоляции, замыкания на бетонную массу и перегорания токопроводящих жил оба конца провода соединяются отводами из изолированного монтажного одножильного медного провода с жилой сечением не менее 2,5 мм². Заизолированные соединения греющих проводов с отводами должны располагаться в бетоне после укладки смеси. Вторые концы отводов из медного одножильного провода соединяются с инвентарной кабельной или из инвентарных секций шинопроводов электроразводкой открытого типа, подводящей электропитание к греющим проводам. При этом подключение греющих проводов производится таким образом, чтобы обеспечивалась равномерная загрузка всех трех фаз трансформатора. В случае выполнения греющего провода требуемой длины из нескольких частей они соединяются между собой скрутками, надежно изолируются в бетонной смеси.

В целях снижения трудоемкости работ отводы можно выполнять монтажным проводом от группы из нескольких нагревателей с минимальным количеством узлов соединений. Это достигается подключением концов смежных нагревателей в одной точке к отводу. Все узлы соединений изолируются водостойкой электроизоляционной лентой. Отводы от нагревателей следует располагать с одной стороны монолитных конструкций или по осевым линиям, отмечая их через один узелками для удобства коммуникации с питающей сетью. Запрещается фиксировать концы и отводы проводов, привязывая их узлом к арматуре, т.к. это может привести к местному перегреву их – и возможно к перегоранию при подаче напряжения.

После установки опалубки перед укладкой бетона следует проверить мегометром отсутствие замыканий прядей греющего провода. До начала бетонирования в случае снегопадов заармированные конструкции с установленными греющими проводами укрываются во избежание попадания в них снега или воды при дождях. Температура бетонной смеси, будучи уложенной

в опалубку, не должна быть ниже 5⁰С. Для обеспечения этого температуру бетонной смеси в барабанах автобетоносмесителей, в бадьях и после укладки каждого слоя в конструкции регулярно замеряют на глубине 5-10 см.

Подключение греющих проводов к питающей электросети производится по мере завершения работ по укладке бетона и отделке его поверхности на отдельных участках бетонируемой захватки, но не позднее чем через 2 часа после укладки бетона, не допуская подмораживания или замораживания бетона и не допуская подключения нагревателей на участках, где бетонная смесь еще в конструкцию не уложена.

Продолжительность прогрева бетона зависит от требуемой распалубочной прочности, установленной СНиП для различных видов конструкций. Набор прочности бетона в зависимости от температуры прогрева может определяться по графикам (рис. 5.5). Во время прогрева бетона в горизонтальных конструкциях категорически запрещается ходить по теплоизоляции, которой укрывается по пароизоляции прогреваемый бетон.

При погонных нагрузках на провода, превышающих 30 Вт/м в армированных монолитных конструкциях, рекомендуется подавать на них напряжение на ступень меньше расчетного, а после 5-6 часов обогрева бетона переключать трансформатор на расчетное напряжение. В дальнейшем по мере твердения бетона при изотермическом выдерживании напряжение электропитания нагревательных проводов может быть понижено на одну или две ступени в зависимости от температуры окружающей среды. Сила тока и напряжение в питающей цепи измеряется не реже двух раз в смену, а в первые три часа с начала прогрева бетона – через каждый час. Визуально проверяется отсутствие искрения в местах электрических соединений.

Контроль температуры бетона в процессе прогрева осуществляется по показаниям технических термометров или электронными приборами, датчики которых погружают в скважины. По температурному контролю проверяется характер нарастания прочности бетона и корректировка подачи напряжения на питающие провода.

По окончании изотермического выдерживания бетона, он остывает путем термосиого выдерживания по возможности с малой скоростью (5-10⁰С/час), но не более 20⁰С/час. При резком понижении температуры наружного воздуха и возникающей опасности более интенсивного охлаждения бетона в конструкции рекомендуется обеспечивать требуемую скорость охлаждения путем периодической подачи напряжения на греющие провода на 0,3-0,5 часа.

§ 5-3. Расчет потребной тепловой мощности.

В период подъема температуры требуемая удельная тепловая мощность определяется по формуле:

$$P_n = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - P_5 = \frac{C_{\delta} \gamma_{\delta} P}{3600} + \frac{\sum C_{oni} \gamma_{oni} \delta_{oni} M_{oni}}{3600} \cdot \frac{P}{2} + \frac{C_a \gamma_a P}{3600} + \frac{KM(t_u - t_{us})}{1000} - 0,8; \quad (2)$$

где P_n – требуемая удельная электрическая мощность, кВт/м³;

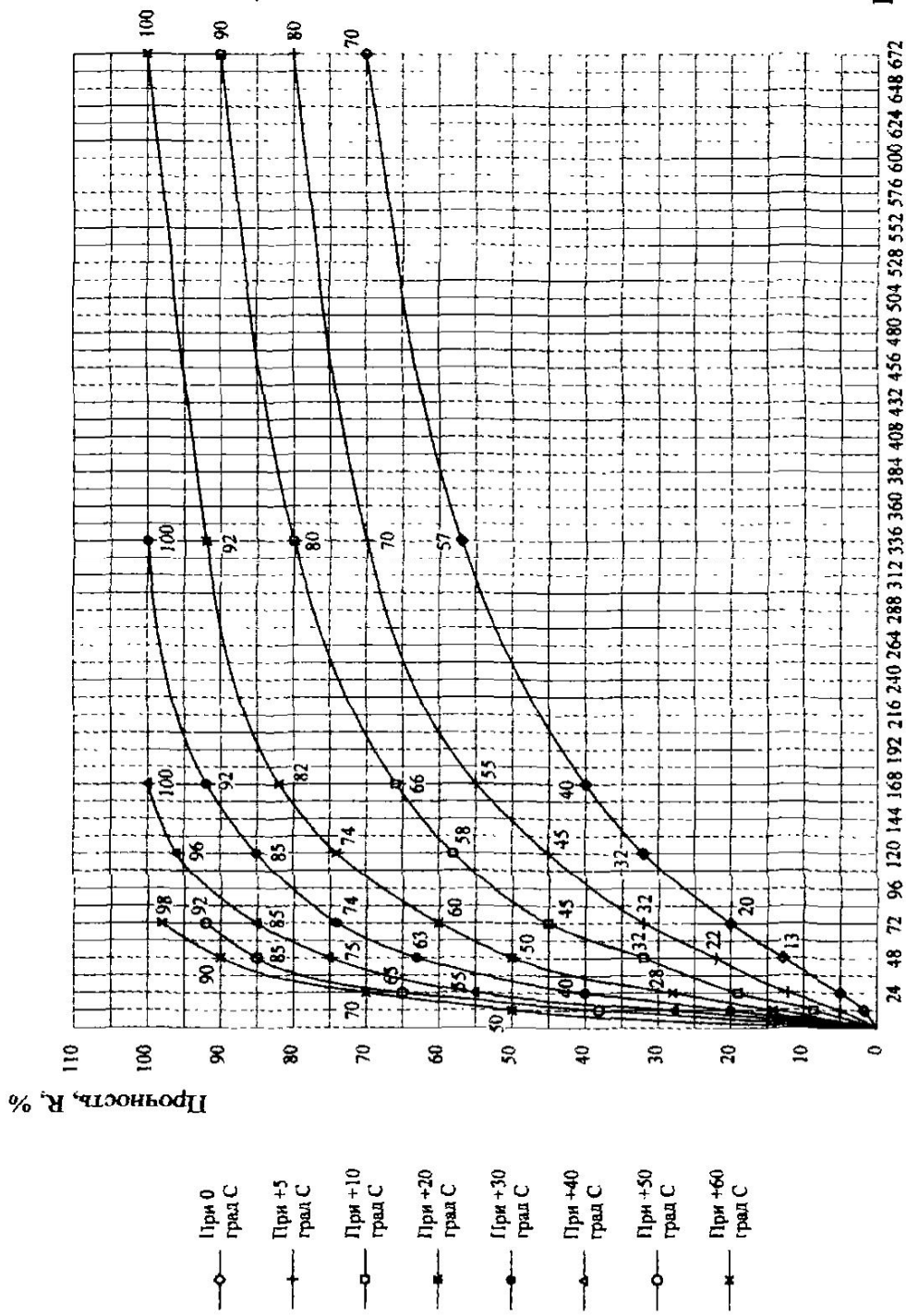


Рис.5.5. Нарастание прочности бетона класса В25...В30 на портландцементе марки 500 в % от R₂₈ при температуре твердения от 0°C до +60°C

$C_{оп}$ – удельная теплоемкость материала опалубки или теплоизоляции, кДж/кг·°С;

C_a – удельная теплоемкость арматуры, кДж/кг·°С;

γ_b – плотность бетона, кг/м³;

γ_a – плотность арматуры, кг/м³;

$\gamma_{оп}$ – плотность опалубки или теплоизоляции, кг/м³;

K – коэффициент теплопередачи опалубки или теплоизоляции, Вт/м²·°С;

$t_{н.в.}$ – температура наружного воздуха, принимается средняя за время остывания бетона, °С;

t_n – начальная температура бетона, град;

$M_{опi}$ – модуль поверхности, $M_{опi} = F_{опi} / V$, м⁻¹

где $F_{опi}$ – площадь указанной поверхности, м²;

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}}; \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°С} \quad (5)$$

где α – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·°С (табл. 5.2 и табл. 5.3);

δ_i – приведенная толщина утеплителя, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности опалубки или теплоизоляции, Вт/м²·°С;

Требуемая тепловая мощность в период изотермического прогрева бетона (P_n) определяется по формуле:

$$P_n = 1,16 \cdot 10^{-3} KM (t_n - t_{н.в.}), \quad \text{кВт} \quad (6)$$

Продолжительность остывания бетона от начальной температуры до конечной в конструкциях с модулем поверхности M_n свыше 3, определяется расчетом по формуле:

$$\tau = \frac{C_b \gamma_b (t_{б.н.} - t_{б.к.}) + ЦЭ}{3,6 KM_n (t_{б.сп.} - t_{н.в.})} \quad (7)$$

$t_{б.к.}$ – температура бетона к концу остывания, принимаем не ниже +5°С;

$t_{б.сп.}$ – температура бетона средняя за время остывания, град;

находим с шагом в 5°С по формуле:

$$t_{б.сп.} = \frac{t_{б.н.} - t_{б.к.}}{1,03 + 0,181 \cdot M + 0,006(t_{б.н.} - t_{б.к.})} \quad (8)$$

Прочность бетона, определяемая по графикам набора прочности бетона за период термообработки, должна быть не менее установленной проектом производства работ.

Увеличение набора прочности достигается увеличением продолжительности остывания за счет снижения величины K и повышения $t_{б.н.}$ до максимально возможной.

Таблица 5.2

Величины теплофизических характеристик строительных и теплоизоляционных материалов

Материал	Удельный вес, кг/м ³	Расчетный коэффициент теплопроводности, Вт/м ² ·°С	Теплоемкость, кДж/кг·°С
Железобетон (W=3%)	2500	2,03	0,84
Бетон на гравии или щебне из природного камня (W=3%)	2400	1,86	0,84
Вата минеральная (W=5%)	100	0,049	0,76
Плиты минераловатные (W=5%)	100	0,052	0,76
Маты минераловатные (W=5%)	50	0,046	0,75
Хвойные породы дерева (W=20%)	500	0,17	2,52
Лиственные породы дерева	700	0,23	2,52
Фанера (W=13%)	600	0,17	2,52
Плиты древесно-стружечные (W=12%)	1000	0,29	2,1
Опилки сухие	250	0,24	
Пенопласт (W=10%)	74	0,043	1,34
Снег сухой	300	0,29	2,1
Сталь	7600	52	0,47
Полиэтилен			2,5
Энергофлекс (вспененный полиэтилен)	30	0,038	
Воздушная прослойка 0,01...0,05 м		0,12...0,16	

Таблица 5.3

Зависимость коэффициента α от скорости ветра

Скорость ветра, м/с	0	1	3	5	10	15
Коэффициент α , Вт/м ² ·°С	3,77	3,88	14,96	26,55	33,18	43,15

§ 5-4. Прогрев бетона с использованием полимерного греющего провода

Полимерный электроизолированный провод устанавливается непосредственно в конструкцию для прогрева бетона и принципы его установки те же, что и проводов с металлической жилой. О его особенностях сказано выше.

Расчет технологических параметров электропрогрева бетона полимерным проводом осуществляется по приводимой методике.

Учитывая надежность изоляционного покрытия проводов, допускается с использованием стандартных устройств электроподключения и автоматизации обогрева, использование напряжений 110-220 В.

В открытом виде полимерный провод эффективно может применяться для прогрева бетона в тонкостенных конструкциях перегородок, стяжек в кровлях и полах, в буронабивных сваях и др.

Расчет сводится к определению потребной удельной электрической (тепловой) мощности, обеспечивающей нагрев бетона до требуемой температуры. При этом мощность может быть выбрана из трех характерных случаев:

а) нагрев бетона с максимально допустимой скоростью, регламентируемой действующими нормами;

б) нагрев бетона до вполне определенной температуры, с подбором необходимой мощности, для конкретных внешних условий, по так называемому саморегулирующему режиму, при котором не требуется применение устройств для регулирования температуры бетона;

в) лишь для компенсации тепловых потерь бетонной смесью, уложенной в опалубку, по методу управляемого термоса.

Потребная электрическая мощность Вт/м² полимерных проводов зависит от массивности прогреваемых монолитных конструкций, расчетной температуры наружного воздуха, скорости ветра и теплопередачи утеплителя. Ориентировочно эти данные можно определить по номограмме на рис.5.6 и рис. 5.7.

Расстояние между смежными проводами (шаг) и количество рядов нагревателей в монолитной конструкции характеризуется требуемой мощностью. Практически это в диапазоне 150-200 мм. Для конструкций контактирующих с грунтом (подготовки под полы, основания и т.п.) шаг может приниматься 200-300 мм.

В ответственных элементах шаг принимается в пределах 100-150 мм, что должно согласовываться с проектной организацией.

Коэффициент теплопередачи стальной опалубки утепленной минераловатными матами может быть определен по номограмме (рис. 5.6).

Длина нагревателя из проводов (м), может быть определена по формуле, приведенной ниже.

Длина нагревателя из греющего провода определяется по формуле

$$l = \sqrt{\frac{V^2}{P \cdot \rho \cdot S}}, \quad \text{м} \quad (9)$$

где S – условное сечение проводной жилы по толщине в мм²;
 V – напряжение тока, В;

P – допускаемая погонная нагрузка на провод Вт/м. Для армирования конструкций принимается от 20 до 30 Вт/м;

p – удельная мощность провода, Вт/см.

Максимальная погонная нагрузка на провод не должна превышать 20-25 Вт/м, т.к. при большой нагрузке температура нагрева провода может превысить 100°C , что приведет к нарушению изоляции и ухудшению качества бетона.

Укладка нагревательных проводов в монолитных конструкциях с минимальным шагом 100-150 мм может обеспечивать максимальную удельную мощность до 600-700 Вт/м². Однако, во избежание перегрева следует принимать в пределах 400-600 Вт/м². При необходимости провод может укладываться в два ряда или усиливать утепление.

Расчетную температуру нагрева провода можно определить по номограмме (рис. 5.6) или приближенно по таблице 5.4.

Таблица 5.4

Погонная нагрузка на провод, Вт/м	10	15	20	25	30
Температура нагрева провода, $^{\circ}\text{C}$	40	50	65	75	85

Для конкретных проводов на рис. 5.8 представлена дополнительно номограмма – график взаимосвязи показателей длины и мощности греющего провода от используемого напряжения. Опыт показывает, что для практических целей определение показателей по этой номограмме вполне достоверно. Однако предлагаем другую технологию расчета по комплексной номограмме, которая представлена на рис. 5.7.

Рассмотрим это на конкретном примере.

Требуется определить, какая должна быть длина электропровода сопротивлением $\rho = 80\text{Ом/м}$, чтобы обеспечить нагрев его до 60°C при напряжении тока 220 В. Принцип решения задачи по номограмме (рис.5.7) достаточно простой. В начале, из точки на шкале температуры $\Delta t = 60^{\circ}\text{C}$ проводим горизонтальную прямую до пересечения кривой характеризующей значение сопротивления провода $\rho = 80\text{Ом/м}$. Далее из точки пересечения опускаем перпендикуляр до пересечения со шкалой, характеризующей напряжение тока. В результате получаем, что длина провода, для этого случая, должна быть 7,6 м. Аналогичным образом, двигаясь по значениям известных параметров номограммы, мы можем определить любой другой показатель по представленным на графике.

Особая эффективность греющего полимерного электропровода проявляется в обогреве бетонных подготовок в полах и в других подобных конструкциях небольшой толщины (рис.5.9).

Технология производства работ заключается в правильном размещении греющих проводов до укладки бетона или после путем их втапливания с поверхности. При необходимости раскладка провода может быть двухслойной в горизонтальных конструкциях (основания, полы и др.).

Расчет производится по методике, изложенной выше.

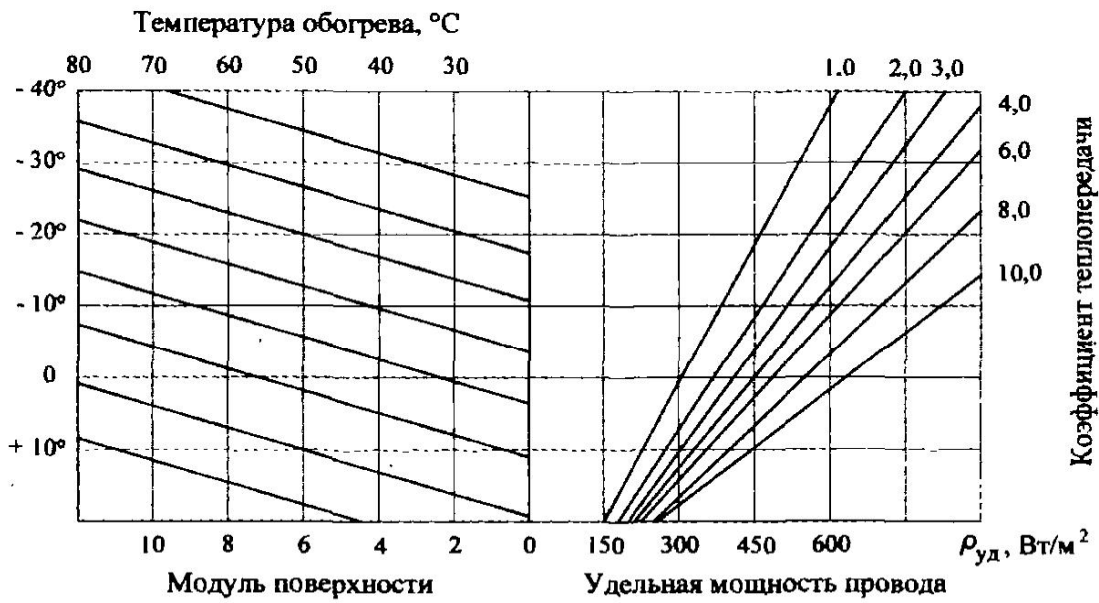


Рис. 5.6. Номограмма по определению удельной мощности греющих проводов с полимерной жилой.

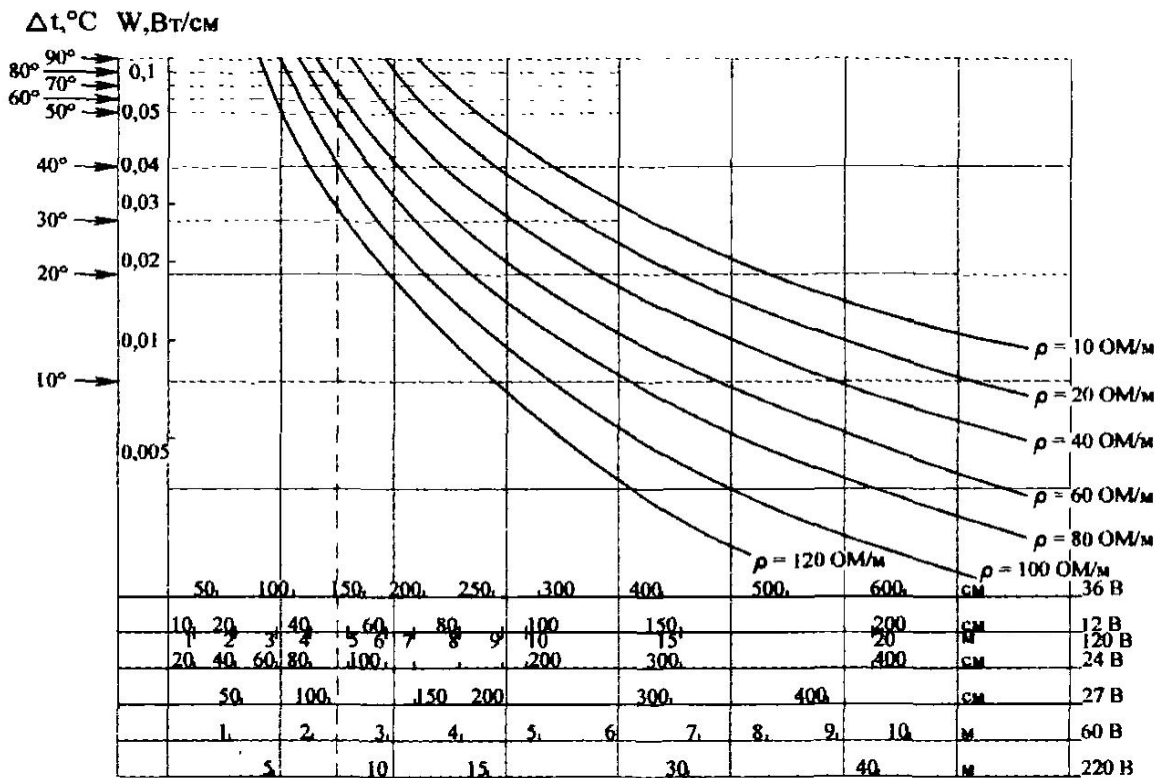


Рис. 5.7. Номограмма по определению взаимосвязанных количественных показателей работы полимерных проводов.

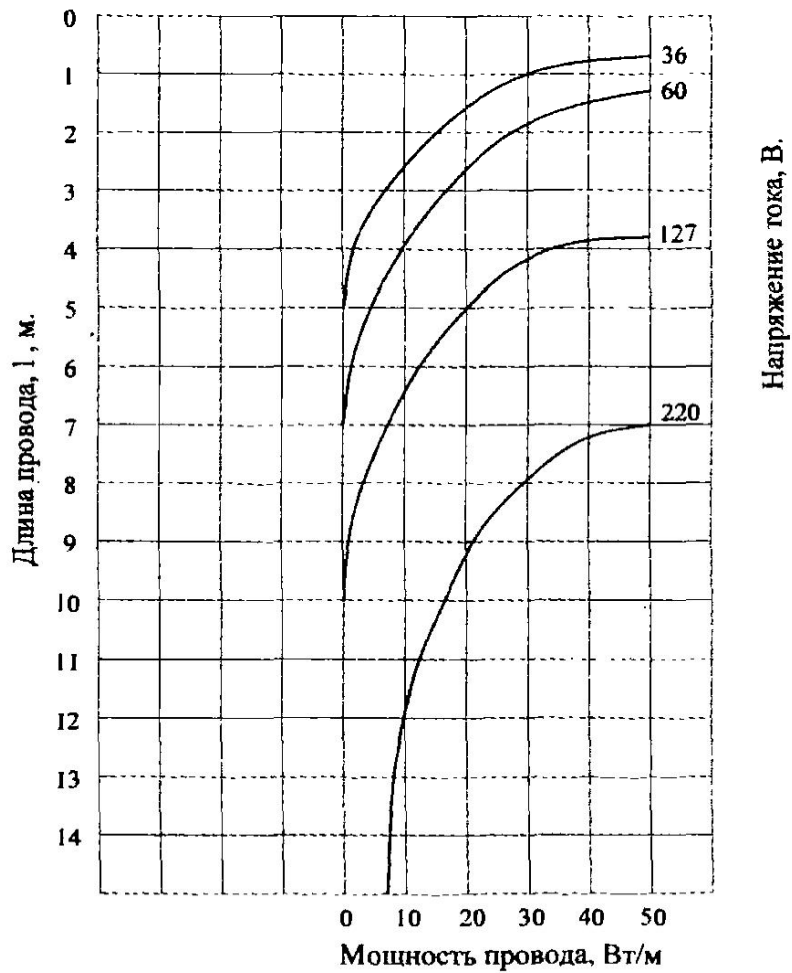


Рис. 5.8. График-номограмма взаимосвязи показателей длины и мощности греющего полимерного провода от используемого напряжения.

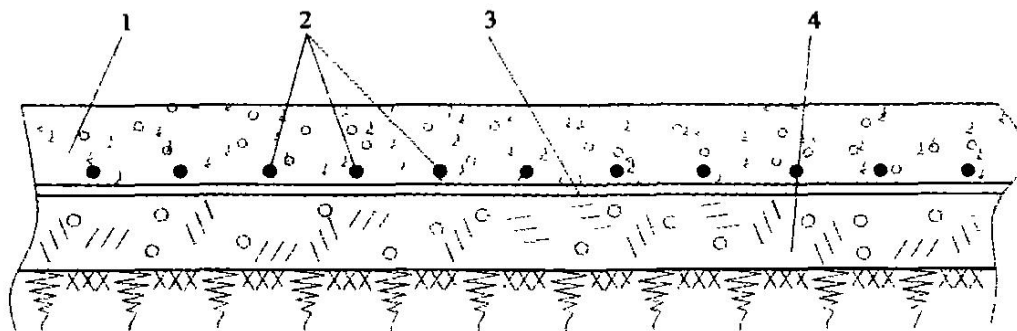


Рис. 5.9. Схема прогрева греющими проводами бетонной подготовки.

- 1 - бетонная подготовка; 2 - греющий провод; 3 - гидроизоляция;
- 4 - уплотненный щебнем грунт.

Часто греющие полимерные провода используются при изготовлении греющих покрывал. Во всех случаях прогрева по мягкому режиму (40-45°C) бетонная подготовка, например, в полах толщиной 120 мм за 10-12 часов приобретает прочность, равную 60-70% от R_{28} .

В практике строительства встречаются случаи, когда порой и в летних условиях возникает необходимость прогрева бетона в буронабивных сваях, поскольку температура грунта на глубине 5,6 и более метров, составляет 5-8°C. Это не соответствует нормам нормального твердения бетона в сваях, из-за чего безопасная их загрузка (также ростверков) существенно задерживается. Поэтому прогрев уложенного бетона в сваях, тем более зимой, крайне необходим.

Рекомендуется для этих целей использовать специальные заготовки устройств из греющего провода. Суть технологии заключается в размещении и закреплении греющего провода на каркасе арматуры в 2-4 нити по сечению. После заполнения скважины бетоном, ток подается на греющие провода и бетон разогревается по расчетному режиму. За 5-6 часов прогрева и период остывания бетона до температуры грунта достигается прочность до 60-70% от R_{28} . Для условий с более низкими температурами среды, режим прогрева корректируется параметрами температуры и продолжительностью прогрева.

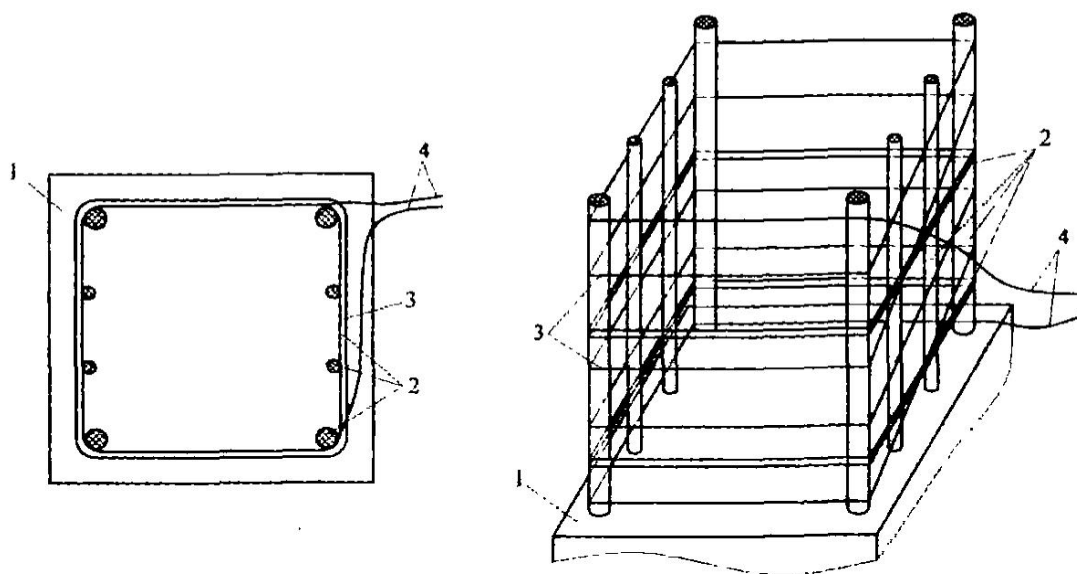


Рис. 5.10. Схема установки греющего провода.

1 - фундамент; 2 - арматура; 3 - греющий провод; 4 - выпуски греющего провода для подключения к питающим электрическим проводам (места подключения должны находиться в бетоне).

§ 5-5. Контроль качества при прогреве бетона греющими изолированными проводами

Перед началом бетонирования должно быть проверено наличие утепляющих материалов, трансформаторов напряжения, нагревательных проводов, а также токоизмерительных клещей, вольтметра, диэлектрических ковров, перчаток и др. Следует проконтролировать отсутствие механических повреждений изоляции проводов, коммуникационной сети, понижающих трансформаторов и другого электрооборудования.

Не реже двух раз в смену измеряют температуру бетонной смеси в барабанах автобетономесителей, в бадьях и после укладки и уплотнения каждого слоя в конструкцию – на глубине 5-10 см.

До начала укладки бетонной смеси должно быть проверено качество очистки снега и наледи основания и арматуры.

После бетонирования следует проконтролировать, как защищены открытые поверхности конструкций пленкой, а также толщину утеплителя поверх нее.

Контроль температуры обогреваемого бетона следует производить техническими термометрами. Число точек измерения температуры устанавливается в среднем из расчета не менее одной точки на каждые 3 м³ бетона, 6 м длины конструкции, 10 м² площади перекрытия, 40 м² площади подготовок полов, днищ и т.п. Температура бетона измеряется следующим образом:

- в бетон закладываются трубки из ПВХ по 10-15 см длиной;
- все отверстия для измерения температуры нумеруются;
- время измерения температуры – 3-4 мин;
- термометры во время измерения температуры должны быть изолированы от окружающего воздуха.

Температуру бетона измеряют в процессе нагрева не реже чем через 2ч.

В период изотермического прогрева – 2 раза в смену. В процессе остывания температуру тонкостенных конструкций толщиной до 10 см измеряют через 4ч, а в средне массивных конструкциях толщиной более 15 см – один раз в смену. Измерять температуру бетона следует в наиболее нагреваемых и охлаждаемых зонах конструкций.

Скорость остывания бетона по окончании тепловой обработки для конструкции с модулем поверхности от 5 до 10 должна быть не более – 5⁰С/ч, свыше 10 - 10⁰С/ч. Один-два раза в смену замеряют температуру наружного воздуха; результаты замеров фиксируются в температурном листе.

Не реже двух раз в смену, а в первые три часа с начала обогрева бетона - через каждый час, следует измерять силу тока и напряжение в питающей цепи. Визуально проверяется отсутствие искрения в местах электрических соединений.

Прочность бетона прогнозируют по фактическому температурному режиму на наименее нагретых участках. Для определения достаточности выдерживания бетона в опалубке или под утеплителем необходимо определить количество градусочасов, полученных им в процессе выдерживания. Для этого необходимо определить средние температуры бетона между двумя замерами его температуры, начиная с момента окончания бетонирования кон-

струкции и укрытия неопалубленных поверхностей, и умножить их на время в часах между замерами температуры. Просуммировать полученные данные, а затем разделить на 20°C . По полученному времени твердения бетона при 20°C по графику нарастания прочности бетона, применяемого на стройке состава, определить ожидаемую прочность бетона в конструкции. Рекомендуется после распалубливания определять прочность обогретого бетона, имеющего положительную температуру, с помощью неразрушающих методов контроля.

Общие требования к контролю качества бетона приведены в СНиП 3.03.01-87 "Несущие и ограждающие конструкции".

§ 5-6. Техника безопасности при прогреве бетона греющими проводами

К работе с греющими проводами допускается персонал, прошедший специальное обучение и ознакомленный с их работой и подключением.

Дежурные электромонтеры должны иметь квалификацию не ниже III группы.

Эксплуатация греющих проводов производится в соответствии с "Правилами устройства и эксплуатации электрических установок" и требованиями СНиП III-4-80 "Техника безопасности в строительстве".

Особое внимание следует обратить:

- на целостность изоляции подводящих электрокабелей;
- на отсутствие механических повреждений.

Эксплуатация системы обогрева с указанными дефектами не допускается.

Подключение греющих проводов производится при отключенном напряжении.

Зона, где производится электрообогрев бетона, должна быть ограждена, на видном месте помещены предупредительные плакаты, правила по технике безопасности, противопожарные средства. Зона производства работ должна быть хорошо освещена.

Доступ посторонних лиц в зону обогрева запрещается.

Все металлические токоведущие части электрооборудования, арматуру следует надежно заземлить, присоединив к ним нулевой провод (жилу) питающего кабеля. При использовании защитного контура заземления, перед включением напряжения, следует проверить сопротивление контура, которое должно быть не более 4 Ом. Около трансформаторов рубильников, постов распределительных, устанавливаются настилы, покрытые резиновыми ковриками.

Участок электрообогрева бетона должен постоянно находиться под надзором дежурного электрика.

Технический персонал, обслуживающий системы электрообогрева, должен пройти обучение, проверку знаний квалификационной комиссии по технике безопасности и получить соответствующие удостоверения. Дежурные электромонтеры должны иметь квалификацию не ниже 3-й группы.

Запрещается:

укладывать греющие провода на подготовленную поверхность, имеющую штыри, режущие кромки, которые могут повредить целостность изоляции проволочных нагревателей;

подключать нагревательные провода в сеть с напряжением, превышающим рабочее;

подключать под рабочую нагрузку находящиеся на воздухе нагревательные провода, если они не забетонированы в конструкции;

подключать нагревательные провода с механическими повреждениями.

§ 5-7. Пример расчета и схема установки греющих проводов в монолитных конструкциях

Для рассматриваемых примеров имеем следующие данные:

1. Опалубка – металлическая, утепленная минеральной ватой толщиной 50мм/коэффициент теплопередачи $K=1,34 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.
2. Укрытие неопалубленных поверхностей – толь, минеральная вата толщиной 50 мм/коэффициент теплопередачи $K=1,34 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.
3. Температура бетона начальная - $+10^\circ\text{C}$.
4. Температура наружного воздуха - -15°C .
5. Температура изотермического прогрева - $+65^\circ\text{C}$.
6. Скорость ветра – 10 м/сек.
7. Нагревательный провод марки ЭПГ – 140-60 с диаметром токоведущей жилы 1,0 мм.

Ниже приводится пример расчета и схемы раскладки нагревательных проводов в монолитных конструкциях (рис. 5.10).

Рассматривается возможность прогрева фундамента. Расчет ведется в следующей последовательности.

1. Определяется модуль опалубливаемой поверхности конструкции

$$M_n = \frac{F}{V} = \frac{1 \cdot (1 \cdot 1) + 4 \cdot (1 + 1 + 1 + 1)}{4 \cdot 1 \cdot 1} = \frac{17}{4} = 4,25 \text{ м}^{-1},$$

где F – площадь опалубливаемой поверхности, м^2 ;

V – объем конструкции, м^3 .

2. По монограмме, представленной в "Рекомендациях", определяем требуемую удельную электрическую мощность, обеспечивающую обогрев бетона по саморегулирующему режиму. Для конструкции с модулем поверхности $4,25 \text{ м}^{-1}$, разности температур бетона и наружного воздуха 55°C , коэффициенте теплопередачи $K=1,34 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ и расходе цемента 300 кг/м^3 она будет равна 150 Вт/м^2 опалубливаемой поверхности.
3. Для обогрева всей конструкции требуется:

$$P = P_{\text{уд}} \cdot F = 150 \cdot 17 = 2550 \text{ Вт}$$

4. Исходя из предельно допустимой удельной нагрузки на 1 п.м. провода марки ЭПГ – 140-60 диаметром 1,1 мм, равной 20 Вт/м при обогреве желе-

зобетонных конструкций, определяем общую длину нагревательного провода:

$$L_{\text{общ}} = P/20 = 127,5 \text{ м}$$

5. Разбивая общую длину нагревательного провода на 12 нагревателей длиной 10 м, по номограмме, представленной в "Рекомендациях" определяем подаваемое на нагреватели напряжение. При погонной нагрузке на нагреватель 20 Вт/м и длине его 10,17 м необходимо напряжение 220 В.

Схема раскладки нагревательного провода показана на рис. 5.10 данного примера расчета. Нагревательный провод навивают на арматурный каркас конструкции с шагом 125 мм, подключают к источнику электроэнергии. Также с достаточной для практических целей точностью можно определить графически по номограмме, представленной на рис. 5.8.

Глава 6. ОБОГРЕВ БЕТОНА В ГРЕЮЩЕЙ ОПАЛУБКЕ

§ 6.1. Сущность метода и область применения

Сущность метода заключается в обогреве бетона путем передачи теплоты от греющей опалубки в поверхностные слои бетона.

Достигается это трансформацией (переоборудованием) существующих опалубок в греющие щиты. В качестве нагревателей в опалубке могут применяться пластинчатые, стержневые, ленточные, проволочные, сетчатые, трубчатые, коаксиальные, текстильные (тканые), углеродно-волоконные, токопроводящие полимеры и другие, соответствующие требованиям по омическому сопротивлению и срокам службы не менее 5000 часов.

Греющую опалубку целесообразно применять для обогрева тоикостенных и среднемаассивных конструкций (с любой степенью армирования) при температурах наружного воздуха до -40°C , а также в использовании ее для компенсации тепловых потерь пристенными слоями бетона в массивных конструкциях по способу "регулируемый термос".

Обогреву в греющей опалубке могут подвергаться и массивные конструкции в районах, характеризующихся резкими перепадами температуры в течение суток, применяя "регулируемый термос", выдерживая при этом расчетную продолжительность остывания монолитных конструкций.

Греющую опалубку можно использовать для обогрева бетона, уложенного в стыки, швы и местные заделки, для отогрева мерзлых грунтовых, бетонных и искусственных оснований, удаления наледи с арматуры и др.

Греющая опалубка в технологии зимнего бетонирования перспективна не только в техническом аспекте, но и в экономическом, т.к. все затраты на трансформацию опалубки в греющую являются единовременными и, как правило, составляют не более 7-8% от стоимости опалубки для летнего периода строительства. С учетом увеличения оборачиваемости самой опалубки или, как минимум, палубы, и уменьшения трудозатрат на организацию прогрева конструкции эти затраты неоднократно окупаемы. Следует отметить, что при прочих равных условиях в России спрос на греющую опалубку значительно выше, чем на сезонную, следовательно, затраты на трансформацию будут компенсированы при реализации.

В отличие от большинства других способов зимнего бетонирования производство греющих щитов или трансформацию опалубок в греющие щиты следует производить только в заводских условиях, а их ремонт и переоборудование – в специализированных организациях.

§ 6.2. Конструкции греющих опалубок

Конструкция опалубки должна отвечать требованиям технологии производства, предъявляемой к опалубкам (прочность, устойчивость, несложность сборки и разборки, обеспечение ровной формируемой поверхности бетона в конструкции и равномерности распределения температуры на палубе щита). В конструкциях опалубки целесообразно применять стандартные и аттестованные электрические нагреватели, допущенные к производству работ. Все

другие, индивидуально изготавливаемые, должны тщательно контролироваться по возможной электрической мощности, сопротивлению и другим электротехническим показателям, допускаемых по безопасности производства работ. По степени нагрева нагреватели могут быть низкотемпературными (из проводов ПОСХВ, ПОСХП, ПОСХВТ и др.), которые целесообразно применять при мягких режимах нагрева (50-60⁰С) и, высокотемпературные (из труб, кабелей, ТЭНов и др.), используемые при режимах прогрева до высоких температур (70-80⁰С) в крупногабаритных и многооборачиваемых опалубках.

К низкотемпературным нагревателям относится также большая группа, созданных в последние годы электронагревателей на основе углеродистых греющих проводов и пластин на композиционной основе, которые успешно применяются в жилищно-гражданском монолитном домостроении и зарекомендовали как наиболее безопасные и надежные в эксплуатации.

Размещение нагревателей на опалубке осуществляется по ее наружной поверхности и зависит от их разновидностей, мощности и режимов прогрева. Это возможно как на металлических, так и на фанерных (древесносодержащих) опалубках.

Изучение конструкций греющих щитов показало, что они состоят из трех основных элементов:

- нагревателя;
- теплоизоляционного слоя;
- несущей основы.

В зависимости от взаимного расположения этих элементов принципиальная конструктивная схема греющих щитов опалубок может представляться в виде схем, приведенных на рисунке 6.1.

Из рассматриваемых схем следует, что греющие щиты могут быть разделены на две группы: I – с несущей основой (палубой), контактирующей с бетоном; II – с нагревателем, контактирующим с бетоном.

Каждая из этих групп имеет свои особенности и определяет узкий круг материалов, применяемых для греющих щитов и типа нагревателей, используемых для этих целей.

В I группе наиболее рациональной является греющий щит, показанный на схеме А. Практически с этой конструкции началась разработка греющих щитов опалубок. В греющих щитах схемы А палуба должна выполняться из материала с высокой теплопроводностью, т.к. нагреватель находится за палубой.

Как правило, в таких греющих щитах палуба стальная из листа толщиной 2-4 мм. Преимуществами данной конструкции являются: возможность применения любых нагревателей; простота крепления нагревателей к многочисленным ребрам жесткости; отсутствие внешних воздействий на нагреватели, кроме вибрационных и, следовательно, относительная их долговечность. Недостатками являются: некоторая громоздкость самой конструкции, необходимость решения вопросов, связанных с мостиками холода при любой теплоизоляции; относительная неравномерность температурных полей на поверхности обогрева при применении линейных нагревателей; сложность ремонта щитов при повреждении нагревателей. Несмотря на это, в таких греющих щитах возможно вполне эффективно проводить обогрев бетонных конструкций.

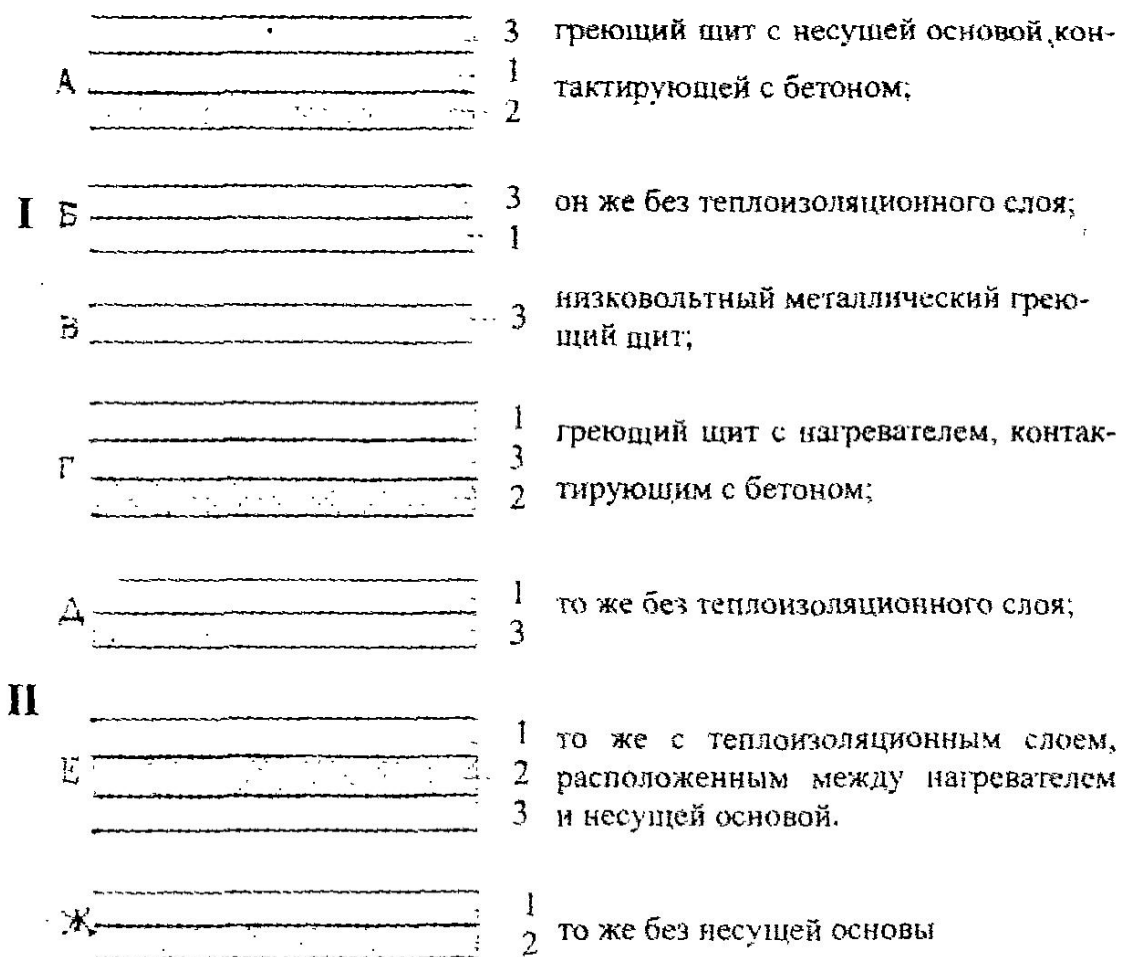


Рис. 6.1. Конструктивные схемы греющих щитов

1- нагреватель; 2- теплоизоляционный слой; 3- несущая основа

Производство греющих щитов по схемам Б и В практически возможно, но представляется нецелесообразным по причине больших теплотерь в окружающую среду.

Наиболее интересными в технологическом аспекте являются греющие щиты II-й группы. Принципиальным и новым для греющих щитов этой группы является установка нагревателя на контактирующую с бетоном поверх-

ность палубы. Недостатком данной конструкции является износ нагревателя в связи: с механическими воздействиями, его контактом с укладываемой бетонной смесью, твердеющим бетоном и распалубкой. Преимуществами являются: отсутствие адгезии нагревателей к бетону и, как следствие, возможность отказа от смазки; возможность крепления нагревателя на любую палубу или возможность трансформации в греющие щиты любой из существующих систем опалубок с палубой из фанеры; увеличение оборачиваемости фанеры; ликвидация мостиков холода и проблем связанных с ними; равномерность температурных полей на поверхности обогрева; простота технологии замены палубы современных опалубок и нагревателя установленного на них; значительное снижение затрат энергии на обогрев и, как следствие, уменьшение требуемых установочных мощностей на строящихся объектах.

Наиболее простыми в исполнении являются греющие щиты, приведенные на схемах Г и Д. В случае, если несущее основание греющего щита выполненного по схеме Г из металла, то вопросы мостиков холода остаются и их надо решать. Вследствие большой разности величин коэффициентов линейного температурного расширения плоских полимерных нагревателей и металлов, вопрос надежного крепления к металлическим палубам несколько усложняется.

Если несущая основа выполнена из фанеры, то проблемы, связанные с приклеиванием нагревателя практически снимаются. В случае, если коэффициент теплопередачи через несущую основу высок, т.е. палуба выполнена из толстого слоя фанеры или из досок, то можно отказаться от теплоизоляционного слоя и проектировать греющие щиты по схеме Д. Очень интересным в плане существенного снижения энергозатрат является греющий щит, приведенный на схеме Е. При реализации данной схемы меняются требования к теплоизоляционному слою, т.к. чрез теплоизоляцию все нагрузки передаются несущей основе.

Установлено, что в качестве материала для этих целей можно использовать жесткий пенополиуретан объемной массой 30-50 кг/м³. Единственная проблема, которая возникает при реализации на практике этой схемы, является слишком медленное остывание конструкции до температур, позволяющих производить распалубку. Поэтому при бетонировании в таких греющих щитах следует, не дожидаясь остывания конструкции, производить распалубку и немедленно укрывать конструкцию рулонным теплоизоляционным материалом. Одним из вариантов схемы Е является термоактивный щит, показанный на схеме Ж. Данную конструкцию, следует рассматривать как плоский нагреватель с эффективной теплоизоляцией, который можно установить на любую опалубку с быстрой его заменой при необходимости.

Совершенно очевидно, что для реализации схем термоактивных щитов, приведенных во II-й группе, следует иметь плоский нагреватель, удовлетворяющий всем эксплуатационным, электротехническим, электрофизическим и физико-механическим характеристикам. К таким нагревателям относятся электропроводные полимеры.

§ 6.3. Расчет энергетических параметров нагрева.

При расчете мощности, необходимой для регулируемого кондуктивного нагрева, прогреваемую конструкцию, нагреватель, разделительную стенку и теплоизоляцию следует рассматривать как совокупность плоских тел, находящихся во взаимном теплообмене и теплообмене с окружающей средой. В этом случае мощность, требуемая на стадии подъема температуры P_p , будет складываться из мощности для нагрева бетона по заданному температурному режиму P_b , мощности, необходимой для нагрева собственно нагревателя P_H , и разделительной стенки $P_{p.c.}$, а также мощности, которую следует затратить для компенсации теплопотерь в окружающую среду $P_{т.п.}$, за вычетом мощности, эквивалентной интенсивности тепловыделения бетона $P_{э.р.}$. В случае отсутствия теплоизоляции между нагревателем и окружающей средой, необходимо дополнительно учесть мощность, затраченную на нагрев опалубки $P_{оп.р.}$.

Таким образом, в общем случае при кондуктивном нагреве в период подъема температуры

$$P_p = P_b + P_H + P_{p.c.} + P_{оп} + P_{тп} - P_{э.р} \quad (1)$$

Мощность, необходимая для нагрева бетона P_b , определяется по формуле

$$P_b = \frac{\lambda_b(t_{б.к} - t_{б.о.})}{\delta \cdot \left(\frac{\alpha_b \tau}{\delta^2} + \frac{1}{3} \right)} \quad (2)$$

где α_b - коэффициент теплопроводности бетона;

δ - толщина уложенного слоя бетона при одностороннем обогреве или половина его - при двустороннем обогреве;

λ_b - теплопроводность бетона.

Величину P_H с достаточной точностью, можно определить как

$$P_H = C_H \gamma_H \delta_H \frac{t_{H.к} - t_{H.н}}{\tau_p} \quad (3)$$

где τ_p - время разогрева;

$t_{H.к}$ и $t_{H.н}$ - соответственно конечная и начальная температуры нагревателя.

А поскольку $t_{H.к} = t_{б.н}$, а $t_{H.н}$ можно определить как

$$t_{H.н} = \frac{t_{б.о.} + t_b}{2}, \quad (4)$$

то

$$P_H = C_H \gamma_H \delta_H \frac{2t_{б.к} - t_{б.о.} - t_b}{2\tau_p} \quad (5)$$

По аналогии с этим
$$P_{p.c} = \frac{2t_{б.к} - t_{б.о} - t_{в}}{2\tau_p} \sum C_{p.c.i} \gamma_{p.c.i} \delta_{p.c.i} \quad (6)$$

где $t_{б.о}$ - начальная температура бетона;
 $t_{в}$ - температура окружающей среды;
 $t_{б.к}$ - конечная температура нагревателя;
 τ_p - время разогрева;
 $C_{p.c.i}, \gamma_{p.c.i}, \delta_{p.c.i}$ - соответственно удельная теплоемкость, плотность материала и толщина i -го слоя разделительной стенки.

Аналогично предыдущему и с учетом (4), получим

$$P_{оп} = C_{оп} \gamma_{оп} \delta_{оп} \frac{1}{\tau_p} \cdot \frac{t_{б.к} - t_{б.о}}{2} \quad (7)$$

где $C_{оп}$ - удельная теплоемкость опалубки;
 $\gamma_{оп}$ - плотность опалубки;
 $\delta_{оп}$ - толщина опалубки.

В соответствии с общепринятым подходом и с учетом (4), величину $P_{т.п}$ на стадии подъема температуры можно представить как

$$P_{т.п} = K \frac{2t_{б.к} + t_{б.о} - 3t_{в}}{4} \quad (8)$$

Величина $P_{э.р}$ определяется по формуле :

$$P_{э.р} = Q_i \zeta \frac{\delta}{2\tau_p} [1 - (1 + b, \tau_p) \exp(-b, \tau)] \quad (9)$$

где Q_i - удельная теплота гидратации цемента;
 ζ - удельное содержание цемента в бетоне.

В период изотермического выдерживания мощность нагревателя $P_{нз}$ затрачивается лишь на компенсацию теплотерь в окружающую среду $P_{тп.нз}$ за вычетом мощности, эквивалентной тепловыделению цемента на этой стадии термообработки $P_{э.нз}$:

$$P_{нз} = P_{тп.нз} - P_{э.нз} \quad (10)$$

известно, что
$$P_{тп.нз} = K \cdot (t_{б.к} - t_{в}) \quad (11)$$

Греющая опалубка является тепловой установкой с различными нагревателями. Характеристики нагревателей для греющей опалубки приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Нагреватели для греющей опалубки

№	Наименование ГОСТ или ТУ, организация-разработчик	Конструкция	Краткая техническая характеристика	Особые условия применения
1	2	3	4	5
<i>Линейные нагреватели</i>				
1.	Трубчатые электронагреватели (ТЭНы)	Стальная трубка, наполненная прессованной окисью магния (периклаз), внутри которой находится спираль из нихрома, на концах металлические вводы с контактными гайками.	Наружный диаметр трубы от 12 до 20 мм. Напряжение от 127 до 380 В, мощность от 600 до 1200 Вт/п.м. Длина от 400 до 1200мм. Форма линейная, U-образная, угловая. Шаг нагревателя от 200 до 300 мм.	Нагреватели выпускаются серийно промышленностью. Срок службы не менее 4000 ч.
2.	Греющий кабель марок ПНФЭ и КНВПЭВ, серия НО	Стальная или нихромовая жила в электроизоляции из поливинилхлорида с плетеным экраном из проволоки в наружной изоляции.	Диаметр токопроводящей жилы от 0,2 мм до 1,5 мм, наружный диаметр от 3 до 6 мм.	Нагреватели серийно выпускаемые промышленностью. Срок службы кабеля практически неограничен. Кабель вибростоек.
3.	Электрические нагреватели марки ЭНГЛ-180	Полосы теплостойкой резины с завулканизированным в нее нихромовым проводом. Лента длиной от 25÷10п.м комплектуется при параллельной или последовательной схеме включения в электрическую сеть. Несколько лент размещаются в чехле из теплостойкой резины с теплоизоляцией, включающей воздушные прослойки, и образуют нагревательное устройство.	Напряжение до 380 В, удельная мощность от 60 до 100 Вт/п.м. Шаг нагревателей от 40 до 80 мм. Удельная мощность нагревательных устройств от 720 до 1440 Вт/м ² . Тепловое сопротивление термоизоляции 0,8 Вт/м ² ·°С.	Нагреватели серийно выпускаются промышленностью.

1	2	3	4	5
4.	Трубчато-стержневые электронагреватели. Разработчик – НИИЖБ	Арматурные гладкие стержни из стали класса А-I (ГОСТ 5781-82) размещены в стальных трубах с наружным диаметром от 19 до 26 мм и толщиной стенки не менее 2,5 мм (ГОСТ 8732-78). Зазор между поверхностями стержня и трубы обеспечиваются надетыми на стержень кольцами из электроизоляционного материала длиной 20-30 мм с шагом 400-500 мм. Стержни включаются в электрическую цепь последовательно. Нагреватели крепятся к форме с помощью сварки.	Масса нагревателей от 1 до 2 кг/п.м. Рабочая температура до 300 °С. Мощность нагревателей от 0,2 до 0,6 кВт/п.м. Шаг нагревателей 200 мм.	Срок службы неограничен. Нагреватели вибростойки. Крепление непосредственно к каркасу опалубки с обратной стороны палубы. Из-за нестабильности удельного электрического сопротивления стали электрические характеристики каждого нагревателя следует определять экспериментально и подбирать нагреватели, близкие по удельной мощности для создания равномерного температурного поля на контакте формы с бетонным изделием.
5.	Углково-стержневые нагреватели. Разработчик – НИИЖБ	По конструктивному исполнению близки к трубчато-стержневым нагревателям (см. выше). Отличаются размещением стержня не в трубе, а в полости, образованной стальным уголком, приваренным к стальной полосе или стальному листу.	То же, что и трубчато-стержневые нагреватели за исключением массы, которая составляет 1,5-2,9 кг/п.м. Шаг нагревателей 300 мм.	То же.
6.	Стержневые нагреватели	Стержни круглого или иного сечения из стали или нихрома. Крепление на изоляторах или кронштейнах из электроизоляционного материала. В зависимости от электрического сопротивления стержней, их количества и напряжения в питающей	Рабочая температура нагревателя не более 250°С. Шаг нагревателей 200 мм.	Срок службы неограничен. Нагреватели вибростойки.

1	2	3	4	5
		сети, стержни одной формы коммутируются последовательно или параллельно группами с последовательным соединением стержней в группе.		
Плоские нагреватели				
7.	Сетчатые электронагреватели. Разработчик – НИИЖБ.	Полосы из тканой металлической сетки, последовательно соединенные между собой медными шинами и размещенными между двумя слоями электроизоляционного теплостойкого материала. Ширина полос 50-200 мм. Сетка тканая из латуни с размером ячейки 2,8 мм и диаметром проволоки 0,45 мм по ГОСТ 6613-73 или из низкоуглеродистой стали с теми же размерами по ГОСТ 3826-82.	Масса нагревателя 3-3,5 кг/м ² . Рабочая температура на поверхности нагревателя не выше 200 ⁰ С. удельная электрическая мощность 0,8-1,2 кВт/м ² . Расстояние между кромками соседних нагревателей до 200 мм.	Срок службы неограничен. Нагреватели вибростойки.
8.	Пластинчатые электронагреватели	Конструкция такая же, как сетчатых нагревателей. Отличие в том, что полосы выполнены из металлической ленты. Материал полос – сталь, никром.	Напряжение до 127 В. Мощность до 1500 Вт на 1 п.м. Температура на поверхности до 400 ⁰ С.	Срок службы неограничен. Нагреватели вибростойки.
9.	Нагреватели из токопроводящей углеграфитовой ткани. Разработчик – Институт проблем материаловедения АН УССР и НИИСК Госстроя СССР.	Полосы из углеграфитовой ткани УУТ-2 толщиной 0,5-0,6 мм с пресованными по концам медными или латунными шинами, размещенными между слоями теплостойкой электроизоляции (стеклоткань, стеклохолст, асбестовая ткань, листо-	Масса нагревателей 0,3 кг/м ² . Температура на поверхности нагревателя до 650 ⁰ С. Удельная мощность до 5,6 кВт/м ² .	Гарантированный срок службы нагревателей 50000 часов. Нагреватели вибростойки.

1	2	3	4	5
		вой асбест и т.п.) с нерабочей стороны палубы.		
10.	Модульные нагреватели типа МН. Разработчик – институт проблем материаловедения АНУССР, НИИСП Госстроя УССР.	Несколько полос углеграфитовой ткани УУТ-2, последовательно соединенных – между собой и запрессованных между двумя слоями стеклоткани (или материала РЭКС-ТАР), пропитанными фенолформальдегидной смолой, отвержденной при давлении 3,5 МПа. Полосы размещаются с нерабочей стороны палубы. Размеры в плане 1,15x0,25 м, толщина 2-2,5 мм. Крепление, как и нагреватели, из углеграфитовой ткани.	Масса 0,35 кг. Мощность 400Вт (удельная мощность 1 кВт/м ²). Напряжение 70 В. Температура на поверхности 130 ⁰ С.	Срок службы 50000 часов. Нагреватели вибростойки.
11.	Полимерное греющее покрытие. Разработчик – МИСИ им. Куйбышева.	Электропроводящий слой из полимера с наполнителем из технического углерода и молотого графита, с электроизоляцией обеих поверхностей стеклотканью, пропитанной полимерной смолой и защитным слоем из полимера на контакте с поверхностью бетона. Размещается на рабочей поверхности деревянной палубы. В качестве связующего применяют фенолформальдегидную, эпоксидную, полипропиленовую и полиуретановую смолы.	Толщина токопроводящего слоя до 3мм, напряжение от 49-121 В подводится с помощью находящихся в токопроводящем слое электроконтактов из фольги или латунной сетки. Удельная мощность от 150 до 1500 Вт/м ² .	Срок службы 5000 часов. Нагреватели вибростойки. Греющие покрытия изготавливаются, как правило, на предприятиях стройиндустрии.

1	2	3	4	5
12.	Термоактивное гибкое покрытие сшивное ЦНИИОМТП	Нагреватель из углеграфитовой ткани в электроизоляции из стеклохолста, пропитанного бутилкаучуковой мастикой в чехле из прорезиненной ткани, прошитом насквозь.	Наружные размеры 1400 x 2400 x 40 мм, напряжение от 49 до 103 В. Удельная электрическая мощность от 150 до 600 Вт/м ² .	Нагреватель вибростоек. Оборотность до 180 оборотов. Изготовление на экспериментальной базе ЦНИИОМТП и базах филиалов института.
13.	ТАПП, клеенное ЦНИИОМТП	Нагреватели из углеродистой ткани в такой же изоляции, как поз.12, приклеенные резиновым клеем к рабочей поверхности в чехле с прорезиненной тканью.	Наружные размеры 920 x 1870 x 30 мм. Напряжение от 49 до 103В. Удельная электрическая мощность от 150 до 600 Вт/м ² .	То же.
14.	ТАПП для бетонирования высотных сооружений ВНИПИТеплопроект	Цилиндрический фартук из стеклохолста, прошитого никромовым проводом, с наружной теплоизоляцией из минераловатных матов, подвешенных к подмостям скользящей опалубки.	Напряжение 220 В. удельная мощность от 60 до 900 Вт/м ² . Температура на поверхности 80 ⁰ С.	Вибростоек. Срок службы до 2000 часов. Изготавливает трест "Спецжелезобетонстрой".

В процессе изготовления греющей опалубки такие важные параметры как геометрические характеристики нагревателей, электро- и теплофизические характеристики материала, из которого они изготовлены, форма и размеры нагревателей и электродов для плоских нагревателей, а также расстояния между ними фиксируются и сохраняются неизменными на всем протяжении эксплуатации опалубки или формы. И единственным фактором, подающимся произвольному варьированию, остается рабочее напряжение. Поэтому электротехнический расчет греющих опалубок заключается в определении такого сочетания перечисленных параметров, которые в доступном для производства диапазоне рабочих напряжений обеспечило бы гамму мощностей, необходимых для прогрева по заданным режимам различных конструкций в разнообразных внешних условиях.

Известно, что при заданном напряжении мощность электронагревательного устройства определяется электрическим сопротивлением его активной части. Этот показатель является обобщенным параметром, который рекомендуется определять опытным путем.

Как правило, напряжение на низкой стороне масляных трансформаторов, используемых для тепловой обработки бетонных конструкций равно $49 \div 127$ В. Задавшись минимальной мощностью нагревателей, например, в 150 Вт/м^2 при напряжении 49 В, несложно определить, что при напряжении 127 В мощность греющей опалубки будет равна 1008 Вт/м^2 . Эффективность использования полученных мощностей для обогрева бетонных конструкций зависит от конструктивных решений греющей опалубки и применяемых теплоизоляционных материалов.

§ 6.4. Определение коэффициента теплопередачи

Коэффициент теплопередачи греющих опалубок зависит от многих переменных: площади поверхности открытых ребер каркаса, размеров щита, скорости ветра, теплофизических характеристик утеплителя и его толщины, качества герметизации утеплителя, расположения утеплителя по отношению к нагревателю и т.п.

Максимальная толщина утеплителя в греющей опалубке, как правило, ограничивается высотой ребер жесткости каркаса щитов для греющих опалубок сконструированных по схеме А рис. 6.1. Поэтому оптимальный, с точки зрения экономических и эксплуатационных показателей опалубки, коэффициент теплопередачи греющих щитов определяется путем подбора соответствующих утепляющих материалов и конструкций теплоизоляции.

Конструкция и толщина утеплителя должны обеспечивать теплопотери не более 35% для щитовой разборно-переставной и блок-формы от общих теплопотерь для щитов, изготовленных по указанной схеме. Во всех остальных случаях теплопотери значительно ниже и составляют до 10%. Столь высокие теплопотери предопределяются тем, что коэффициент теплопередачи у существующих конструкций греющих опалубок находится в пределах от 1,75 до $7,65 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

При конструировании греющей опалубки следует задаться целью уменьшить теплопотери до 10%.

Через мощности, требуемые на разогрев конструкций по заданному режиму, это ограничение запишется как:

$$P_{TII} \leq 0,1 \cdot (P_b + P_{оп}) \quad (12)$$

или
$$K \frac{2t_{БК} + t_{БО} - 3t_B}{4} \leq 0,1 \cdot (P_b + P_{оп}), \quad (13)$$

где K - коэффициент теплопередачи через опалубку, который для многослойного щита равен:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (14)$$

где α - коэффициент теплообмена наружной поверхности щита опалубки с окружающей средой;

δ_i - толщина теплоизоляционного слоя опалубки;

λ_i - коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя опалубки (индекс « i » - присвоен изоляционному слою опалубки).

Результаты расчетов минимальной величины с различным модулем опалубленной поверхности M_{II} , а также среднего значения (δ_i / λ_i) приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2

Величины δ_i / λ_i для конструкций различной массивности, средние значения $(\delta_i / \lambda_i)_{ср}$ и относительные отклонения от частных значений.

Модуль опалубленной поверхности M_{II} , м ⁻¹	4	6	8	10	12	Среднее значение $(\delta_i / \lambda_i)_{ср}$
δ_i / λ_i	0,623	0,676	0,703	0,666	0,654	0,664
$\Delta(\delta_i / \lambda_i) \%$	-6,58	+1,77	+5,55	+0,33	-1,53	

Для конкретных конструкций греющих опалубок коэффициенты теплопередачи могут приниматься по таблице 6.3.

Использование жесткого пенополиуретана в качестве теплоизоляции для опалубок значительно уменьшает теплопотери, однако процесс остывания конструкций после изотермического выдерживания чрезмерно удлиняется и может дойти до нескольких суток, что приведет к резкому сокращению оборачиваемости греющей опалубки.

Для эффективного использования греющей опалубки в подобных случаях рекомендуется распалубливание конструкций производить по мере набора прочности, указанной в проекте производства работ, с последующим немедленным его укрытием гибкими теплоизоляционными покрытиями.

Таблица 6.3

Коэффициенты теплопередачи различных конструкций греющих опалубок

№№ п/п	Конструкция теплоизоляции	Коэффициент теплопередачи	
		Вт/м ² ·°С	%
1	2	3	4
1.	Жесткий пенополиуретан плотностью 45 кг/м ³ толщиной:		
	50 мм	0,66	100
	40 мм	0,83	125
	30 мм	1,00	152
2.	Фанерный щит с двумя палубами толщиной 12мм с воздушной прослойкой толщиной 40 мм и брезентовым укрытием	1,75	265
3.	То же, без брезентового укрытия	2,3	348
4.	Теплоотражающий экран из алюминиевой фольги, минераловатный мат толщиной 40 мм, фанера толщиной 3 мм	3,07	465
5.	Минералватный мат толщиной 40 мм и фанера толщиной 3 мм	3,44	521
6.	Фанерная палуба толщиной 12 мм с брезентовым укрытием	4,6	637
7.	Воздушная прослойка толщиной 15 мм, фанерный щит с сотовым наполнителем толщиной 30мм, утепление по контуру минераловатой	4,84	733
8.	Воздушная прослойка толщиной 30 мм, фанера толщиной 3 мм, уплотнение по контуру минераловатой	5,83	883
9.	Фанерная палуба толщиной (мм) :		
	10	7,65	1153
	12	6,75	1022
	18	5,75	811
	21	5,25	735

§ 6.5. Выбор шага линейных электронагревателей

Шаг линейных электронагревателей определяется из условий обеспечения равномерного температурного поля по всей плоскости палубы. Температурные перепады на палубе допускаются не более 5°С на поверхности щита.

Выбор шага линейных электронагревателей должен производиться с учетом толщины и материала палубы, удельной электрической мощности, коэффициента теплопроводности бетона и утеплителя. Правильный выбор этих параметров должен обеспечивать в соприкасающихся с палубой пристеинных слоях бетона температурные градиенты не выше критических, при которых возникающие в поверхностном слое бетона напряжения не приводят к необратимым деструктивным явлениям, к снижению его прочностных и качественных характеристик.

Перепад температуры (ΔT) на палубе между расположенными вплотную к ней смежными линейными нагревателями диаметром до 6 мм может быть вычислен по формуле

$$\Delta T = \frac{4P_{\text{э}}b}{\pi\lambda_{\text{п}}} \sum_{n=1}^3 \frac{1}{(2n-1) \left[e^{\nu(2n-1)} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{\text{б}}}{\lambda_{\text{п}}} \right) - e^{-\nu(2n-1)} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{\text{б}}}{\lambda_{\text{п}}} \right) \right]}, \quad (15)$$

где $P_{\text{э}}$ - удельная мощность электронагревателя, Вт/м²;

b - шаг электронагревателей, м;

$\lambda_{\text{п}}$ - коэффициент теплопроводности материала палубы щитов, Вт/м · °С;

$e = 2,72$;

$\lambda_{\text{б}}$ - коэффициент теплопроводности бетона, Вт/м · °С;

$$\nu = \frac{2\pi\delta_{\text{п}}}{b},$$

где $\delta_{\text{п}}$ - толщина палубы щитов, м.

Оптимальный шаг линейных электронагревателей диаметром до 6 мм в греющей опалубке со стальной палубой при допустимых температурных градиентах на поверхности обогреваемых конструкций до 0,4-0,5 град/см, что соответствует перепаду в 2-2,5°С при шаге 100 мм, следует принимать по номограмме рис. 6.2.

Оптимальный шаг b и нагрузку p на единицу длины линейных электронагревателей круглого сечения диаметром 12-16 мм с установленным над ними теплоотражающим экраном в греющей опалубке со стальной палубой рекомендуется принимать по таблице 6.4.

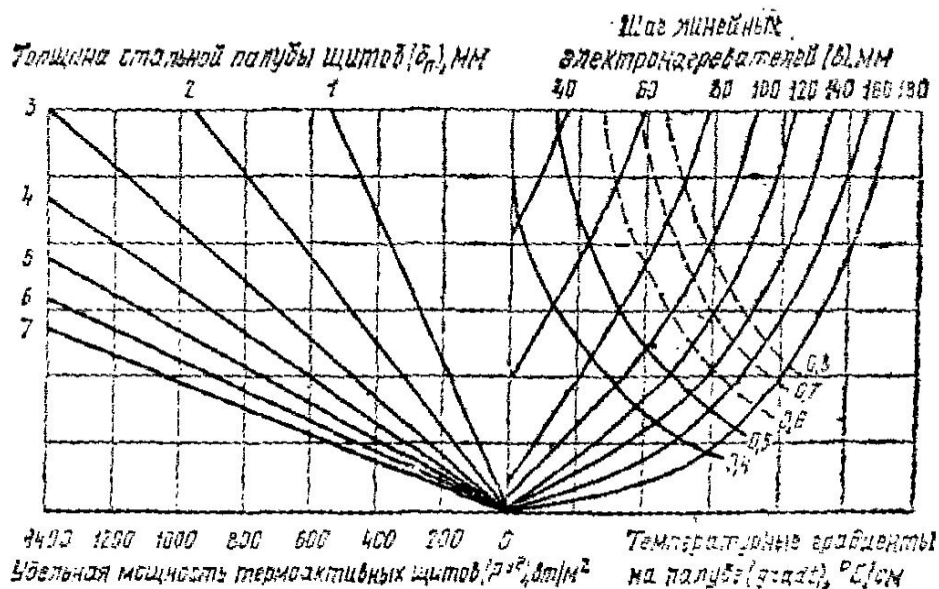


Рис. 6.2. Номограмма для определения оптимального шага линейных нагревателей диаметром до 6 мм в стальной греющей опалубке.

Таблица 6.4

Определение оптимального шага линейных электронагревателей круглого сечения диаметром 12-16 мм в греющей опалубке со стальной палубой

Толщина стальной палубы, мм	Удельная мощность электронагревателей, Вт/м ²									
	600		800		1000		1200		1300	
	<i>b</i> , мм	<i>p</i> , Вт/м	<i>b</i> , мм	<i>p</i> , Вт/м	<i>b</i> , мм	<i>p</i> , Вт/м	<i>b</i> , мм	<i>p</i> , Вт/м	<i>b</i> , мм	<i>p</i> , Вт/м
2	100	60	90	75	80	85	70	90	70	95
3	135	80	130	105	120	120	100	120	85	115
4	180	100	170	130	160	155	120	145	110	145
5	200	110	190	145	180	170	140	165	130	165
6	220	120	210	160	190	180	170	200	160	200

Значение шага и нагрузок на единицу длины, определенные по монограмме и таблице, приведены для линейных электронагревателей, расположенных вплотную к палубе. При расположении их с зазором до 5 мм от палубы в случаях, когда невозможна их установка вплотную к палубе, шаг и нагрузку на единицу длины нагревателей следует увеличить до 15%.

Шаг проволочных электронагревателей, запрессованных в слое термостойкого диэлектрика на фанерной палубе в плоскости, соприкасающейся с бетоном, а также нагрузку на единицу длины, следует принимать по таблице 6.5.

Таблица 6.5

Шаг проволочных нагревателей, запрессованных в слой термостойкого диэлектрика

Удельная мощность нагревателей, Вт/м ²	Нагрузка на единицу длины проволочных нагревателей, Вт/м	Шаг проволочных нагревателей, мм	Максимальная температура нагрева палубы, °С
700	11-15	15-20	75
600	10-15	15-25	65
500	10-15	20-30	55
400	10-14	25-35	50
300	10-12	30-40	45
200	8-10	35-40	35

Для уменьшения теплопотерь греющего щита электронагреватели следует располагать вплотную к палубе, если это позволяет их конструкция.

Мощность, приходящаяся на единицу длины линейных нагревателей, должна удовлетворять выражению

$$P_n \leq \frac{1,12 \cdot P_w b}{1+b}, \text{ Вт/м}, \quad (16)$$

где P_n - электрическая нагрузка на единицу длины электронагревателей;

P_w - удельная мощность электронагревателей, Вт/м².

Для греющих опалубок с термоактивными покрытиями расстояние между токоведущими электродами определяется из выражения:

$$R = \rho \frac{\epsilon}{\delta \cdot e} \quad (17)$$

где R - электрическое сопротивление участка электронагревателя между двумя токоведущими электродами, Ом;

ϵ - расстояние между токоведущими электродами, м;

δ - толщина токоведущих электродов, м;

e - длина токоведущих электродов, м.

Известно, что

$$R = \frac{U^2}{P_{\text{ув}}} \quad (18)$$

где U - напряжение, подводимое к опалубочному щиту, В.

Подставляя значение в формулу (17), определяем расстояние между токоведущими электродами

$$\epsilon = \frac{U^2}{P_{\text{ув}} \cdot \rho} \cdot \delta \cdot e \quad (19)$$

Установлено, что электрическому полю на поверхности термоактивного покрытия свойственна неравномерность тем более значительная, чем больше расстояние между токоведущими электродами и меньше их ширина.

Температурный перепад на поверхности термоактивного покрытия зависит, в основном, от расстояния между электродами и подводимого напряжения: при увеличении расстояния между электродами он уменьшается, а с повышением напряжения – возрастает.

Оптимальным с точки зрения обеспечения перепадов температур на тепловоспринимающей поверхности бетонируемой конструкции и требуемых скоростей подъема температур в диапазоне рабочих напряжений понижающих трансформаторов - расстоянием между токоведущими электродами следует принимать от 0,2 м до 0,5 м.

§ 6.6. Конструкции греющей опалубки с электронагревателями

Конструкция опалубки должна отвечать требованиям ГОСТ 23477-79 и ГОСТ 23478-79 и обеспечивать равномерную температуру на палубе щита.

При этом должны быть предусмотрены доступ к нагревательным элементам и легкая замена нагревателей в случае выхода из строя.

В качестве утеплителей рекомендуется применять теплоизоляционные материалы с объемной массой не более 200 кг/м³; плотность их не должна превышать паспортную более чем на 15%, влажность – на 6% при обеспечении стабильности теплофизических свойств опалубки.

В конструкциях опалубки должны, как правило, применяться стандартные электрические нагреватели. При использовании нестандартных нагревателей необходимо контролировать электрическую мощность и сопротивление, а также стабильность электрических показателей. Электрическое сопротивление изоляции нагревателей и коммутирующей разводки должно быть не менее 0,5 МОм.

Нагреватели могут быть различными, но срок их службы должен составлять не менее 2000 ч. Низкотемпературные нагреватели из разных типов проводов, целесообразно применять при низких температурах, мягких режимах обогрева; при их использовании необходим особенно тщательный температурный контроль.

Нагревательные кабели типа КНМС рассчитаны на высокую температуру и имеют большой срок службы, поэтому их выгоднее применять в инвентарных многооборотных опалубках в соответствии с таблицей 6.6.

Таблица 6.6

Нагревательные кабели КНМС

Электрическая нагрузка на единицу длины, Вт/м	50	80	100	120	140
Температура нагревателя, °С, при коэффициенте сопротивления теплопередаче утеплителя $0,29 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$	148	203	236	265	290

Высокотемпературные трубчатые электронагреватели (ТЭНы) в основном предназначены для применения в крупногабаритных опалубках, монтируемых краном, однако их виброустойчивость ограничена.

Способ крепления и размещения нагревателей на палубе опалубки зависит от их мощности, режимов обогрева и других факторов. Греющие провода и кабели целесообразно устанавливать вплотную к палубе; высокотемпературные нагреватели типа ТЭНов могут быть установлены как вплотную к палубе, так и на расстоянии от нее, если это позволяет конструкция ТЭНов и температура на их поверхности.

При установке нагревателей вплотную к палубе необходимо тщательно контролировать режимы и температуру обогрева, а также шаг установки нагревателей во избежание местных перегревов, больших температурных деформаций и формирования неравномерного температурного поля на поверхности палубы, контактирующей с бетоном.

Шаг установки нагревателей диаметром до 6 мм может быть принят по номограмме рис. 6.1.

При установке высокотемпературных нагревателей с зазором 3-5 мм по отношению к палубе шаг нагревателей можно увеличивать на 15% при скоростях подъема температуры до 7 град/час. При более высоких скоростях подъема температуры для достижения равномерного температурного поля следует применять экраны с высокой отраженной способностью (алюминиевый лист, фольга и др.). Экран устанавливается на расстоянии 5-15 мм от поверхности нагревателя. Для исключения конвективной передачи между экраном и нагревателем делаются перегородки или устанавливаются двойные и даже тройные экраны. Греющую полость по периметру следует загерметизировать (рис.6.3). Способы крепления нагревателей показаны на рис.6.4.

Для равномерного обогрева опалубки высокомоощными нагревателями с широким шагом их установки возможно применение опалубки с разными полями поглощения. Так степень черноты поверхности палубы, обращенной

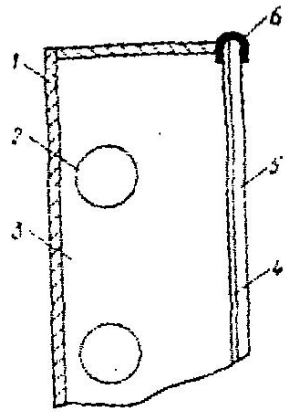


Рис. 6.3. Конструкция греющей опалубки с экраном

1- палуба; 2- нагреватель; 3- греющая полость; 4- экран; 5- кожух; 6- герметик

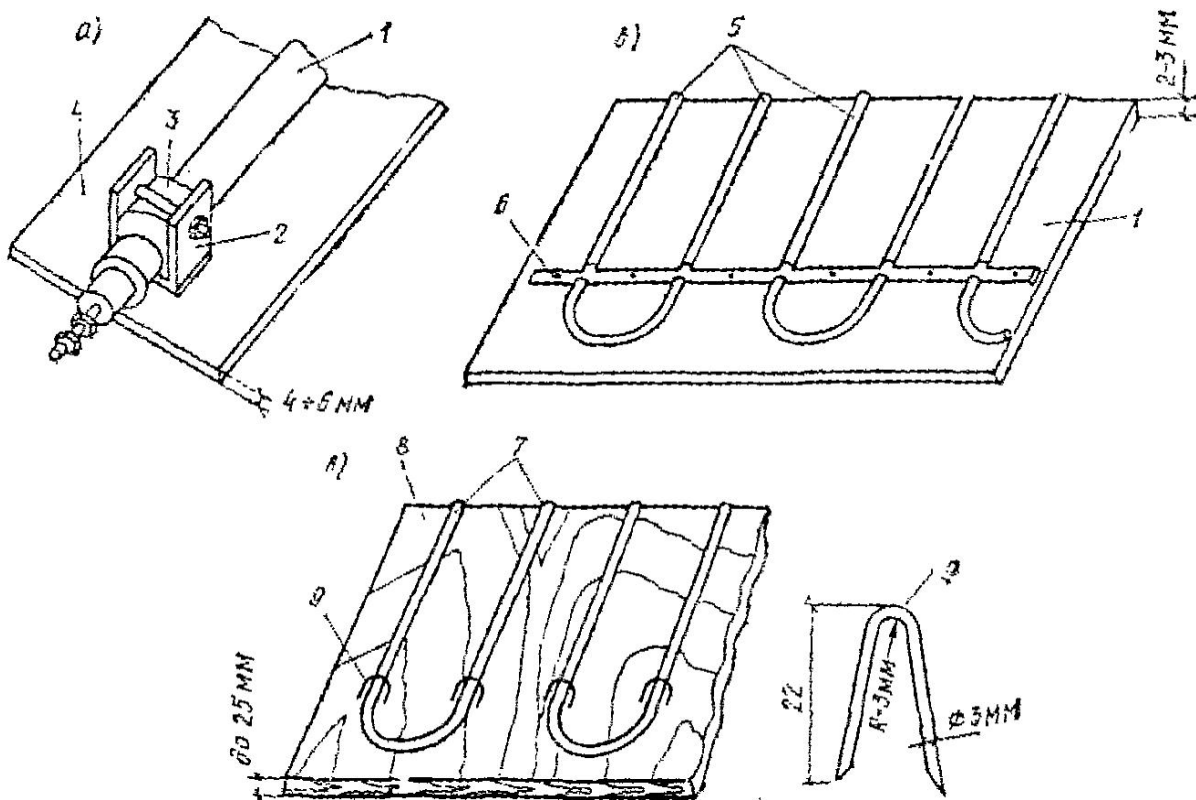


Рис. 6.4. Способы крепления электрических нагревателей в греющей опалубке

а- ТЭНов; б- кабелей типа КНМС; в- проводов типа ПOCXBT в деревянной опалубке;

1- ТЭН; 2- стальной хомут; 3- прокладка из асбеста; 4- стальная палуба;
 5- кабель КНМС; 6- полоса на точечной сварке; 7- провод ПOCXBT;
 8- деревянная палуба; 9- скоба из проволоки диаметром 3 мм.

к нагревателю, обеспечивается нанесением черной теплостойкой краски между соседними нагревателями.

Для переключения кабелей целесообразно использование специального клеммника и муфт, исключающих замыкание на массу и поломки токонесущей жилы. Схема греющей опалубки с нагревательным кабелем показана на рис.6.5.

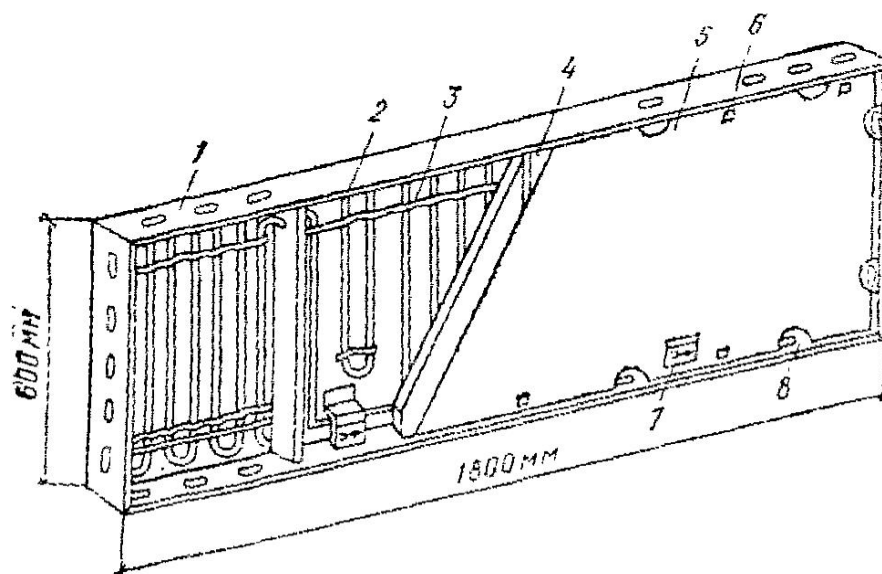


Рис. 6.5. Греющий щит опалубки

- 1- каркас щита; 2- нагреватель; 3- прижимная планка; 4- утеплитель (минераловатные маты 40 мм); 5- защитный кожух (фанера толщиной 3-4 мм); 6- шпилька крепления кожуха; 7- вилочный разъем; 8- вырез для установки соединительных устройств

§ 6.7. Греющие опалубки с нагревателями из углеродистых и графитовых тканей

Кроме известных углеродистых тканей и лент в качестве греющих элементов для опалубок получили применение греющие пластины, изготовленные из этих тканей, где наиболее распространенной является ткань марки "Урал-15". Суть изготовления греющих пластин заключается в запрессовке углеродистых лент, раскроенных по расчету, между двумя слоями стеклоткани, пропитанной составами эпоксидной смолы, или укладке этих лент между двумя теплоустойчивыми электроизоляционными пластинами путем склеивания, что обеспечивает их защиту от замыканий.

Раскрой углеродистой ткани следует осуществлять исходя из габаритов планируемых нагревательных элементов. На рис.6.6 представлен самый распространенный вид такого элемента, который состоит из двух углеродистых лент, контактно соединенных между собой по напыленным омедненным полоскам, с выводом концов из медного провода для подключения.

Одним из сложных процессов при изготовлении нагревательных элементов является создание контактных зон на границе примыкания токопроводящей ткани к подключающему электропроводу или на стыках соединения соответствующих углеродистых полос.

В производственной практике существуют несколько способов:

- Способ плазменного напыления с использованием порошковых металлов, обеспечивающих покрытие высокой электропроводности и возможную пайку не представляет сложности. После облужения напыленной полосы путем помещения в расплав припоя, обеспечивается в дальнейшем надежная пайка проводов.
- Соединение контактов с помощью прижимных пластин или размещения их в толще углеродистой ткани. На рис.6.7 б) представлен вариант стыка с помощью оцинкованной железной полосы, к которой и привариваются контакты. Отгибы ее могут находиться сверху или снизу соединяемых углеродистых лент. Практика их эксплуатации показала, что они достаточно просты при изготовлении и надежны в эксплуатации.
- Существенно простым является способ соединения путем приклеивания контактной металлической пластинки к ткани токопроводящим клеем, который выпускается в промышленности. Подводящий провод подсоединяется также методом пайки. Применять такой способ можно, только в режиме температур, которую выдерживает не разрушаясь клей.

Расчет по раскрытию углеродистой ткани на ленты осуществляется в зависимости от величины ее удельного поверхностного электросопротивления, требуемых габаритов и конфигурации пластин и опалубки.

Электрическое сопротивление ленточного нагревателя определяется по формуле:

$$R = \rho_n \cdot \frac{\ell^2}{a}, \text{ Ом}, \quad (20)$$

где ρ_n - удельное поверхностное электросопротивление, Ом;

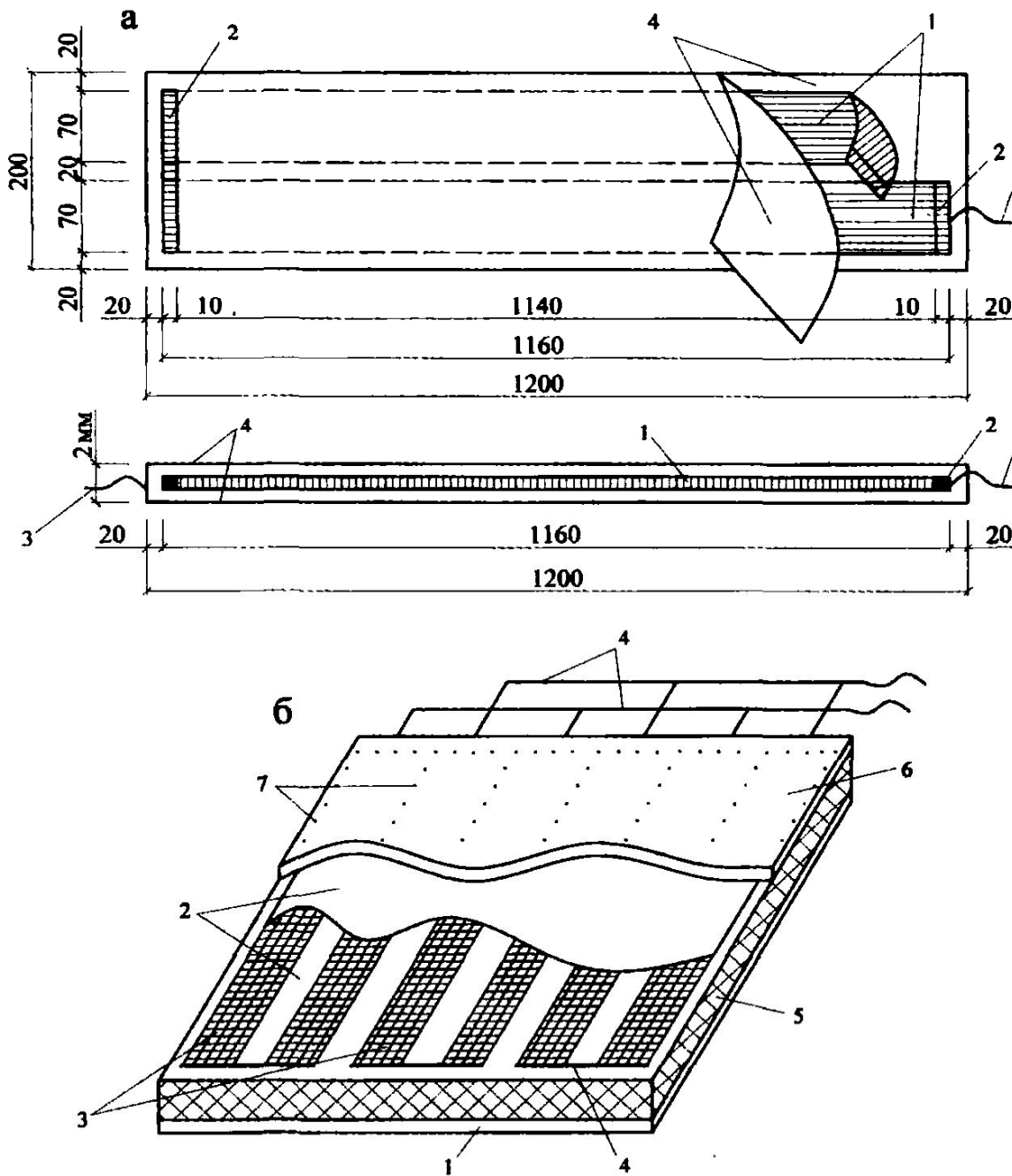


Рис. 6.6. Греющие элементы для опалубки.

а - Схема греющего элемента на основе углеродистых лент:
 1 - углеродистые ленты; 2 - контактные соединения; 3 - медный провод соединения; 4 - электроизоляция из асбеста и поли пленки.

б - Схема собранного опалубочного щита:
 1 - Лист влагостойкой фанеры; 2 - электроизоляция; 3 - тканевые углеродистые ленты; 4 - соединительные медные провода (шины); 5 - утеплитель; 6 - наружный опалубочный щит (палуба); 7 - болты (гвозди) крепления.

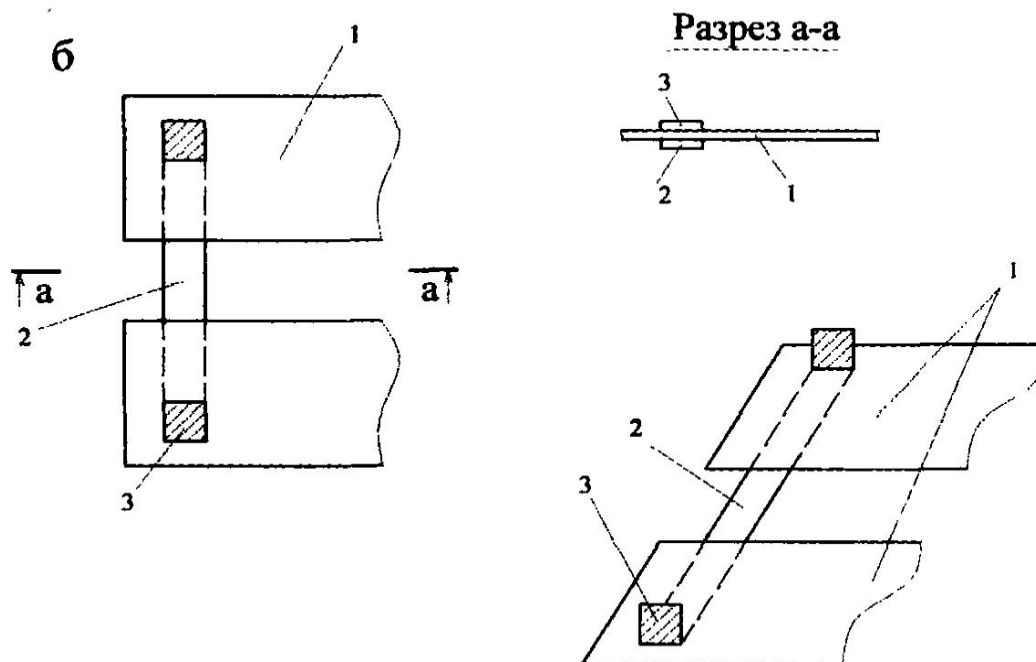
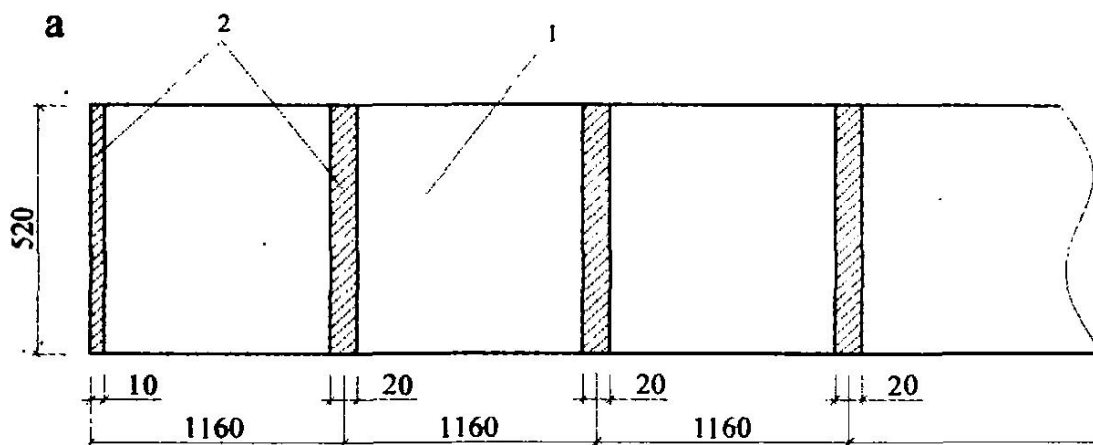


Рис. 6.7. Схема контактов с углеродистой тканью для подключения к электрическим проводам.

а - Схема плазменного напыления контактов на углеродистой ткани:
1 - рулон углеродистой ткани; 2 - контактные зоны плазменного напыления металлического порошка.

б - Контактное соединение оцинкованной полосы с углеродистой тканью:
1 - углеродистая ткань; 2 - оцинкованная полоса на электропроводном кле
3 - отгибы оцинкованной полосы.

ℓ - длина, м;
 a - ширина, м.

Удельная мощность нагревателя, соответственно, в зависимости от напряжения электрического тока и других параметров определяется по формуле:

$$P = \frac{U^2}{\rho_n \cdot \ell^2} \quad (21)$$

Требуемая длина ленты ℓ , или системы лент нагревательного элемента можно определить из преобразованного выражения этой же формулы:

$$\ell = \sqrt{\frac{U^2}{\rho_n \cdot P}}, \quad (22)$$

Для удобства расчетов по представленным зависимостям (21 и 22) можно воспользоваться номограммой (рис.6.8), в которой каждая кривая характеризует влияние показателей удельной мощности и длины элемента при заданном напряжении и фиксированного значения удельного поверхностного сопротивления ткани. По этой номограмме с достаточной для практических целей точностью можно определить любой из интересующих показателей: P , ρ_n , ℓ , a , V , W и др.

При конструировании и расчете нагревательных элементов в виде пластин, основанных на использовании углеродистых тканей, важно определить рабочую температуру на его поверхности, являющуюся главным показателем условий эксплуатации. Точное определение может быть выполнено путем сложных теплотехнических расчетов, включая решение дифференциальных уравнений второго порядка. Однако для облегчения задачи рекомендуется, с некоторой степенью приближения, определять по ниже приведенным формулам, которые подтверждаются многочисленными результатами производственных данных.

Для определения рабочей температуры на поверхности греющего элемента можно использовать уравнение 23

$$\Delta t = 95,6p^2 + 622,7p - 1,1; \quad (23)$$

где, Δt – разность температур между поверхностью нагревателя и окружающей среды, °С;

p – удельная мощность, Вт/м².

Удельную мощность по некоторым известным параметрам можно определить по формуле:

$$p = 4,46\Delta t^2 + 1,75\Delta t - 3,0 \quad (24)$$

Исходными данными для конструирования и расчетов нагревательных элементов являются:

- выбранные геометрические размеры нагревательного элемента;
- требуемая температура на поверхности нагревательного элемента, °С;
- температура окружающей среды, °С;
- принятое напряжение тока, В;
- величина удельного сопротивления углеродистой ткани, которая может быть использована для изготовления нагревательных элементов, Ом/м.

Последовательность расчетов осуществляется в следующем порядке:

- определяется требуемая разность температур между поверхностью нагревателя и окружающей средой

$$\Delta t = t_{\text{пн}} - t_{\text{ос}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (25)$$

где $t_{\text{пн}}$ – требуемая температура поверхности нагревательного элемента, $^\circ\text{C}$;
 $t_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

- определение удельной мощности нагревательного элемента по формуле 24;
- требуемая длина греющих лент в нагревательном элементе определяется по формуле 22, в том числе отдельно для всех разновидностей углеродистых тканей;
- конструирование (сборка) всего элемента осуществляется путем перебора возможных вариантов ткани с соответствующим удельным сопротивлением;
- в заключение осуществляется окончательное определение удельной мощности по формуле 24 и температуры поверхности элемента по выражению:

$$t_{\text{пн}} = t_{\text{ос}} + \Delta t \quad (26)$$

Полученные данные проверяются на соответствие требованиям планируемых нагревателей.

Если имеются превышающие расхождения, то корректируются путем следующих операций:

- изменение длины нагревательного элемента;
- изменение рабочего напряжения тока;
- использование ткани с другим электросопротивлением, требуемая величина которого может быть определена по формуле:

$$\rho_n^{\text{мп}} = \frac{U^2}{l^2 P_y}, \text{ Ом}, \quad (27)$$

где P_y – удельная мощность ткани, $\text{Вт}/\text{см}^2$.

Для удобства определения можно также воспользоваться номограммой (рис.6.8).

Для этого по номограмме из точки на шкале "температура", равная 70°C , ведем условную горизонтальную прямую до пересечения с кривой, соответствующей сопротивлению углеродистой ткани, равного $0,4 \text{ Ом}$. Далее из этой точки опускаем перпендикуляр на горизонтальную ось ординат, которая характеризует длину греющей полосы при использовании тока напряжением 36 В .

В результате в точке пересечения получаем значение требуемой длины греющей полосы, равной $\ell = 200 \text{ см}$. Это величина и закладывается затем для конструирования нагревательного элемента.

Мощность элемента определяется как произведение площади греющей полосы на удельную мощность, которая здесь берется по данным на оси ординат, т.е. в точке совпадения требуемой температуры нагрева полосы 70°C будет соответствовать значению удельной мощности $0,08 \text{ Вт}/\text{см}^2$.

К примеру, если ширина греющей полосы будет равна 8 см , то общая ее мощность для этого случая составит:

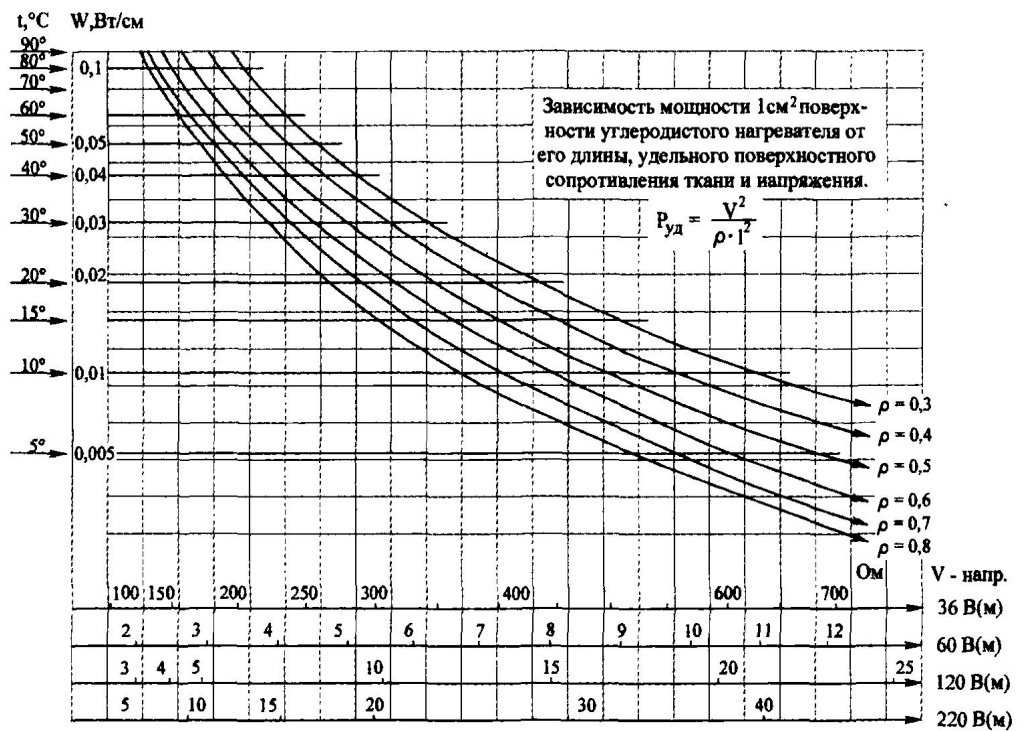


Рис.6.8. Номограмма графического определения параметров прогрева.

$$P_{\text{обн}} = 200 \cdot 8 \cdot 0,08 = 128 \text{ Вт}$$

По аналогии, обратным ходом графически можно определить любые другие параметры (температуру нагрева, удельную мощность, удельное сопротивление).

Пластинчатые нагревательные элементы в большинстве случаев изготавливаются в виде жестких пластин.

Технологические схемы изготовления жестких пластинчатых нагревательных элементов могут быть различны, в зависимости от разнообразия форм и размеров. Однако общим и основным условием их изготовления является качественное создание греющей углеродистой полосы из ткани, с запрессовкой ее в изоляционные слои. Для получения надежных в эксплуатации и высококачественных жестких пластинчатых нагревателей их следует делать в заводских условиях.

Одной из разновидностей греющей опалубки, снабженной графитопластиковыми нагревателями, является опалубка, разработанная в МГСУ под руководством д.т.н., проф. Афанасьева. Эти нагреватели представляют собой графитовую ткань с плоскими электродами, запрессованными в теплостойкую полимерную оболочку. Это позволяет создавать плоские нагреватели различных размеров с необходимыми характеристиками и высокой долговечности (до 15 тыс. часов непрерывной работы) и эксплуатационную надежность (табл.6.7).

Широкий диапазон питающего напряжения (30...380V) дает возможность создавать любые режимы тепловой обработки бетона, а также управляемые – с удельной мощностью от 100 до 1500Вт/м² опалубливаемой поверхности.

Температурный режим рабочей поверхности палубы может регулироваться в диапазоне 60...120⁰С с применением температурных датчиков и системы автоматического регулирования подачи напряжения. Однако, надо помнить, что на соприкасающейся с бетоном поверхности палубы температура не должна превышать 80⁰С. Высокое сопротивление электроизоляции (10⁷...10¹²Ом) обеспечивает электробезопасность системы и высокую эксплуатационную надежность.

Для визуального контроля подачи напряжения термоактивные щиты снабжаются электронными безконтактными лампами, что позволяет осуществлять приемочный контроль эксплуатационной готовности опалубки к укладке бетонной смеси.

Оптимизация конструктивных решений термоактивных щитов позволяет снизить их удельную массу до 12...14 кг/м², что обеспечивает ручную установку в проектное положение. Отличительной особенностью графитопластиковых нагревателей является малая толщина (1,5...2 мм), благодаря чему их размещение под фанерной палубой заметно не увеличивает габариты опалубочных щитов. Использование теплоизолирующего слоя и отражающей фольги обеспечивает повышение энерго-эффективности системы и снижение теплопотерь.

В зависимости от конструктивных элементов термоактивные щиты выполняются: для возведения стеновых конструкций – на полную высоту этажа с элементами крепления в плоскости стен; при возведении перекрытий по

балкам и прогонам используются щиты размерами, кратными модулю 0,3 м (1,2 x 0,9; 1,2 x 1,2; 1,2 x 0,6 и т.д.); для устройства колонн щиты изготавливаются на полную высоту и снабжаются системой горизонтальных и наклонных связей.

Таблица 6.7

Техническне характеристики графитопластиковых нагревателей

№	Технические характеристики	Единицы измерения	Показатели
1	2	3	4
1	Источник электроэнергии		постоянный переменный
2	Напряжение: питание рабочее	В	220...380 20...60
3	Частота тока	Гц	50...60
4	Удельная мощность	Вт/кв.м	100...1500
5	Температура рабочей поверхности	°С	60...120
6	Сопротивление изоляции	Ом	$10^7...10^{12}$
7	Габаритные размеры: ширина длина толщина	мм	30...850 70...1100 1,5...2,0
8	Масса	кг/кв.м	0,8...1,0
9	Ресурс безотказной работы вне зависимости от числа циклов: включение - выключение	час	50000
10	Срок службы при работе в цикличном режиме	лет	15...18
11	Гарантийный срок эксплуатации	лет	5

Расчет температурных полей при возведении различных конструктивных элементов осуществляется путем численного решения уравнения теплопроводности. Характерные расчетные кривые изменения тепловых полей для плоских плит при не утепленной опалубке приведены на рис. 6.9.

Особенностью режимов разогрева и остывания при удельной мощности термоактивной опалубки 300, 500 и 1000 Вт/м², как видно из графиков, является наличие высоких температурных градиентов по толщине плиты, повышение интенсивности разогрева примыкающих к палубе слоев смеси при возрастании удельной мощности нагревателей, и резкое снижение температуры слоев после отключения.

Наблюдается нелинейный характер температурных полей начальной фазы разогрева, что связано с низкой скоростью теплопередачи и влиянием отрицательных температур наружного воздуха.

Минимальные температурные градиенты по толщине слоев и однородное тепловое поле достигается при утеплении открытых поверхностей бетона и опалубки. При достижении максимально заданной температуры бетона изотермическая зона требует минимальной мощности излучателей для поддержания стационарного теплового режима.

При наличии теплоизоляции открытых поверхностей достигаются минимальные температурные градиенты по толщине конструкций; в бетоне формируются более однородные температурные поля, что снижает процесс миграции жидкой фазы из области высоких температур – к более низким. Это обстоятельство исключает развитие деструктивных процессов в твердеющем бетоне.

Оптимизация технологических режимов тепловой обработки бетона в таких опалубках показала, что для сокращения общего цикла наиболее рационально при использовании диапазона удельной мощности в пределах 300...500 Вт/м², что обеспечивает разогрев до $t_b^0 = 60...80^\circ\text{C}$ на период 10...14ч. с последующим термосным выдерживанием 8...10ч. и остыванием 6...8ч. Опытными данными установлено, что скорость остывания составляет 2...3⁰С/час.

В зависимости от температуры наружного воздуха продолжительность циклов может колебаться. Однако в общем плане открывается возможность суточного оборота опалубки при производстве работ не только зимой, но и в летний период.

Общие энергозатраты на достижение бетоном прочности, равной 70% R_{28} для конструкций с модулем поверхности 9...12 составляют не более 80квт час/м³ бетона.

Расчетные и экспериментальные значения интенсивности набора прочности бетоном приведены для различных удельных мощностей термоактивной опалубки на рис.6.10.

В зимнее время целесообразно предварительно разогревать палубу, что обеспечивает не только таяние снега и наледи, но и некоторый отогрев арматурного каркаса.

Укладка бетонной смеси осуществляется на разогретую палубу. Это интенсифицирует процессы твердения бетонов и позволяет совместить технологические циклы укладки и тепловой обработки, повысить качество монолитных конструкций.

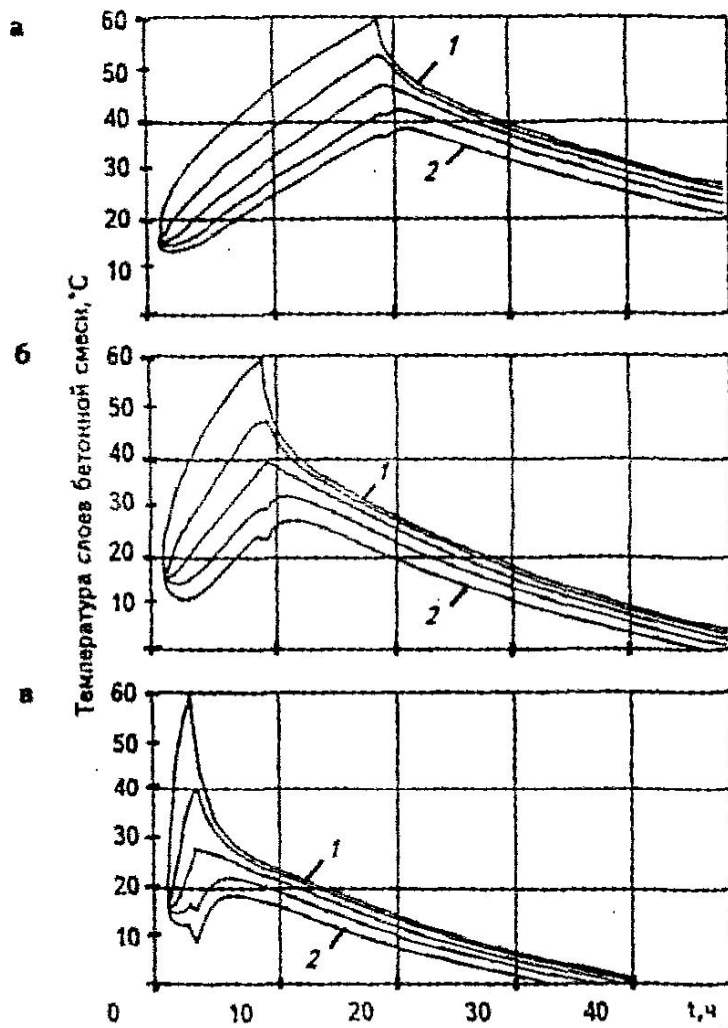


Рис. 6.9. Характер изменения тепловых полей при разогреве и остывании
 плиты
 перекрытия толщиной 200 мм с использованием неутепленной опалубки
 и неопалубленной поверхности бетона с удельной мощностью теплового
 воздействия :
 а – 300 Вт/м²; б – 500 Вт/м²; в – 1000 Вт/м²; $t_n = -20^{\circ}\text{C}$, $t_s = +15^{\circ}\text{C}$;
 1- слой бетонной смеси, прилегающий к опалубке;
 2- поверхностный слой бетонной смеси

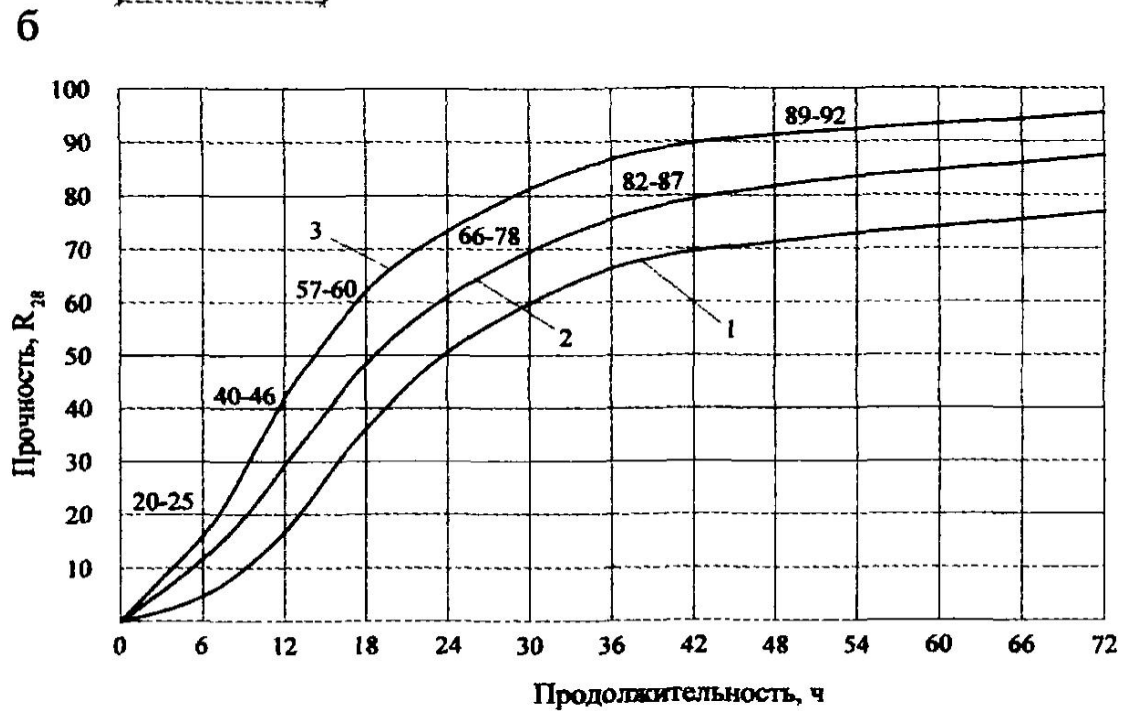
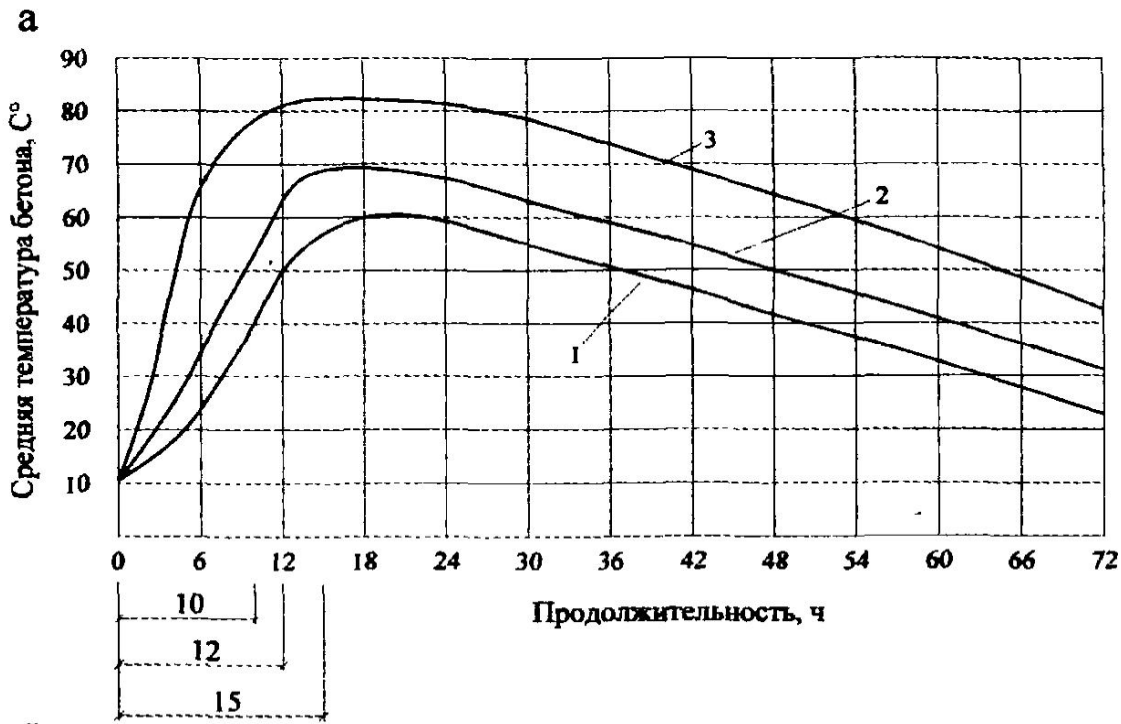


Рис. 6.10. Режимы разогрева и термостого выдерживания бетона в теплоизолированных монолитных перекрытиях (а) и кривые набора прочности бетоном (б).

Удельная мощность теплового воздействия:
 1 - 250 Вт/м²; 2 - 350 Вт/м²; 3 - 500 Вт/м².

§ 6.8. Опалубка с токопроводящим греющим покрытием

Опалубка с токопроводящим греющим покрытием представляет собой обычную опалубку с металлической или фанерной палубой, на рабочей поверхности которой, размещено полимерное покрытие с токопроводящим слоем. К этому слою подводят напряжение, в результате в нем выделяется тепло, поступающее в бетон, находящийся в контакте с полимерным покрытием.

Такие опалубки имеют различные конструктивные решения (рис. 6.11) и состоят из токоведущих электродов; токопроводящего полимерного слоя между электродами; контактного с бетоном полимерного слоя; дублирующего слоя, представляющего собой обычно тканевую основу для надежного крепления полимерного покрытия к несущей основе (металлической или деревянной); теплоизоляционного слоя (рис. 6.12).

Преимуществами использования в качестве электронагревателя полимерного токопроводящего покрытия являются:

- непосредственный контакт электронагревателя с бетоном, что улучшает условия теплопередачи, уменьшает теплопотери и обуславливает снижение расхода электроэнергии;
- упрощение конструкций опалубочных щитов, в которых не требуется устраивать полости для электронагревателей иных типов;
- повышение равномерности температурного поля в обогреваемом бетоне и, соответственно, повышение его качества;
- практически полное исключение адгезии бетона к полимерному покрытию, что позволяет отказаться от смазки и чистки палубы.

Греющее полимерное покрытие размещается на рабочей поверхности палубы. На внутренней стороне опалубки его размещение нецелесообразно, т.к. не позволяет использовать отсутствие адгезии обогреваемого бетона к поверхности полимера и исключить таким образом трудности при распалубки конструкции, а также операции по очистке палубы и ее смазке.

Нижний слой покрытия располагается на палубе и закрепляется на ней. Он служит для электроизоляции покрытия от палубы. На деревянной или фанерной палубе он состоит из одного слоя стеклохолста, пропитанного полимерной смолой. При размещении покрытия на металлической палубе; нижний электроизоляционный слой должен состоять из двух слоев стеклохолста, пропитанного полимерной смолой. Следующий слой – электропроводящий, к нему подводится напряжение и выделяется тепло. Третий слой – электроизоляционный, он образуется одним слоем стеклохолста, пропитанного смолой. В некоторых случаях поверх второго электроизоляционного слоя предусматривают антиадгезионный защитный слой, который контактирует с обогреваемым бетоном.

В качестве электронагревателей для греющей опалубки применяются различные токопроводящие материалы:

- Рулонное полимерное трехслойное греющее покрытие на основе композиции из полипропилена или из полиамидной смолы. Толщина слоя 1 мм. Средний слой – токопроводящий, благодаря содержанию токодисперсного углеродного (или графитового) покрытия. На нижней поверхности покры-

тия закреплена ворсовая ткань для прочного приклеивания покрытия к палубе.

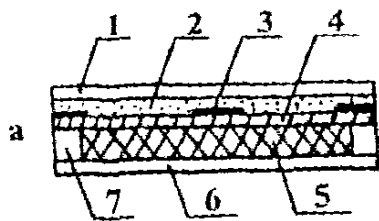
- Полимерные трехслойные листы греющего покрытия со средним слоем из токопроводящей бумаги, пропитанной полиамидной смолой. Суммарная толщина покрытия от 0,45 до 0,60 мм.
- Штучные токопроводящие элементы из полимерной композиции для греющих покрытий изготавливают вручную. В качестве связующего применяют эпоксидную или другую термореактивную смолу. Ее перемешивают с токодисперсным углеродным наполнителем (ацетоновая сажа). Сажа обладает высокой степенью диспергирования в полимере. Количество технического углерода и молотого графита в % от массы композиции в зависимости от минимально допустимой температуры эксплуатации покрытия изменяется от 30 и 20 при температуре -20°C до 10 и 20 при -35°C . Возможно использование других термореактивных смол. После перемешивания с отвердителем и ацетоном, обуславливающим снижение вязкости композиции, ее укладывают в металлические или деревянные формы.

Вблизи торцов плит в композицию закладывают полоски из латунной сетки, выполняющие функции электроконтактов. Отверждение композиции происходит в течение суток при комнатной температуре или при повышенной температуре значительно быстрее, в зависимости от свойств используемой смолы. После распалубливания удельное электрическое сопротивление композиции, например, из эпоксидной смолы ЭД-5, составляет около 60 Ом·м, после выдерживания в течение 60 суток, оно снизилось примерно до 48 Ом·м за счет усадки полимерного связующего, в результате которого происходит сближение тонкодисперсных частиц углеродного наполнителя. В дальнейшем оно продолжает медленно уменьшаться и затухает с течением времени.

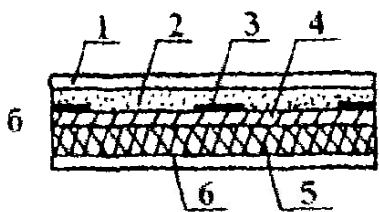
Трехслойные рулоны греющего покрытия изготавливают в заводских условиях на специальных линиях по экструзионной технологии. С линии непрерывно сходит трехслойная лента, которая автоматически сворачивается в рулон. Непрерывная дозировка и поступление исходных материалов в смесители и из них на движущуюся конвейерную ленту осуществляются автоматически. Рулоны покрытия разрезают на месте крепления на опалубку на листы требуемых размеров.

Трехслойные полипропиленовые листы греющего покрытия изготавливают из прессовой технологии следующим образом. Компоненты перемешивают, формуют на поддоне один за другим три слоя покрытия, в средний токопроводящий слой закладывают полоски-электроконтакты из латунной сетки и укладывают поддоны со свежееотформованными листами на полки многоярусной этажерки горячего пресса. Тепловая обработка трехслойных листов происходит в течение трех часов при давлении 1 МПа и температуре 250°C . Размеры листов определяются размерами этажерок горячего пресса. Листы складывают в пакеты, доставляют к месту крепления на опалубку, осуществляют раскрой и крепление их на палубе.

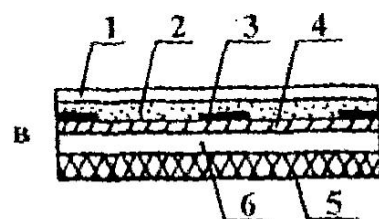
После отверждения полипропилен приведенного состава характеризуется следующими показателями (табл. 6.8).



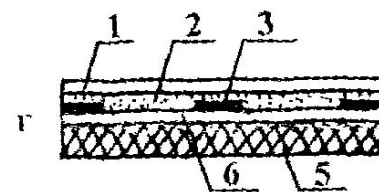
Съемный модульный листовый электронагреватель с несущим каркасом и изоляционным слоем, расположенным на рабочей стороне щита опалубки (элемента формы).



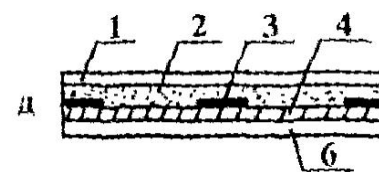
Стационарный листовый электронагреватель с изоляционным слоем, расположенным на рабочей стороне щита опалубки (элемента формы).



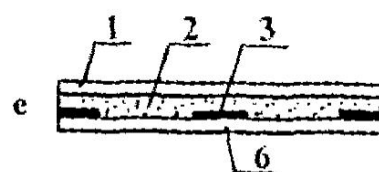
Стационарный листовый или окрасочный электронагреватель с изоляционным слоем, расположенным на тыльной стороне щита опалубки (элемента формы).



То же без дублирующего слоя



Стационарный листовый или окрасочный электронагреватель без изоляционного слоя.



То же без дублирующего слоя.

Рис. 6.11. Принципиальные схемы полимерных электронагревателей для тепловой обработки бетона:

- 1- контактный слой; 2- проводящий слой; 3- токоведущие электроды;
- 4- дублирующий слой; 5- теплоизоляционный слой; 6- несущая основа;
- 7- ребра каркаса

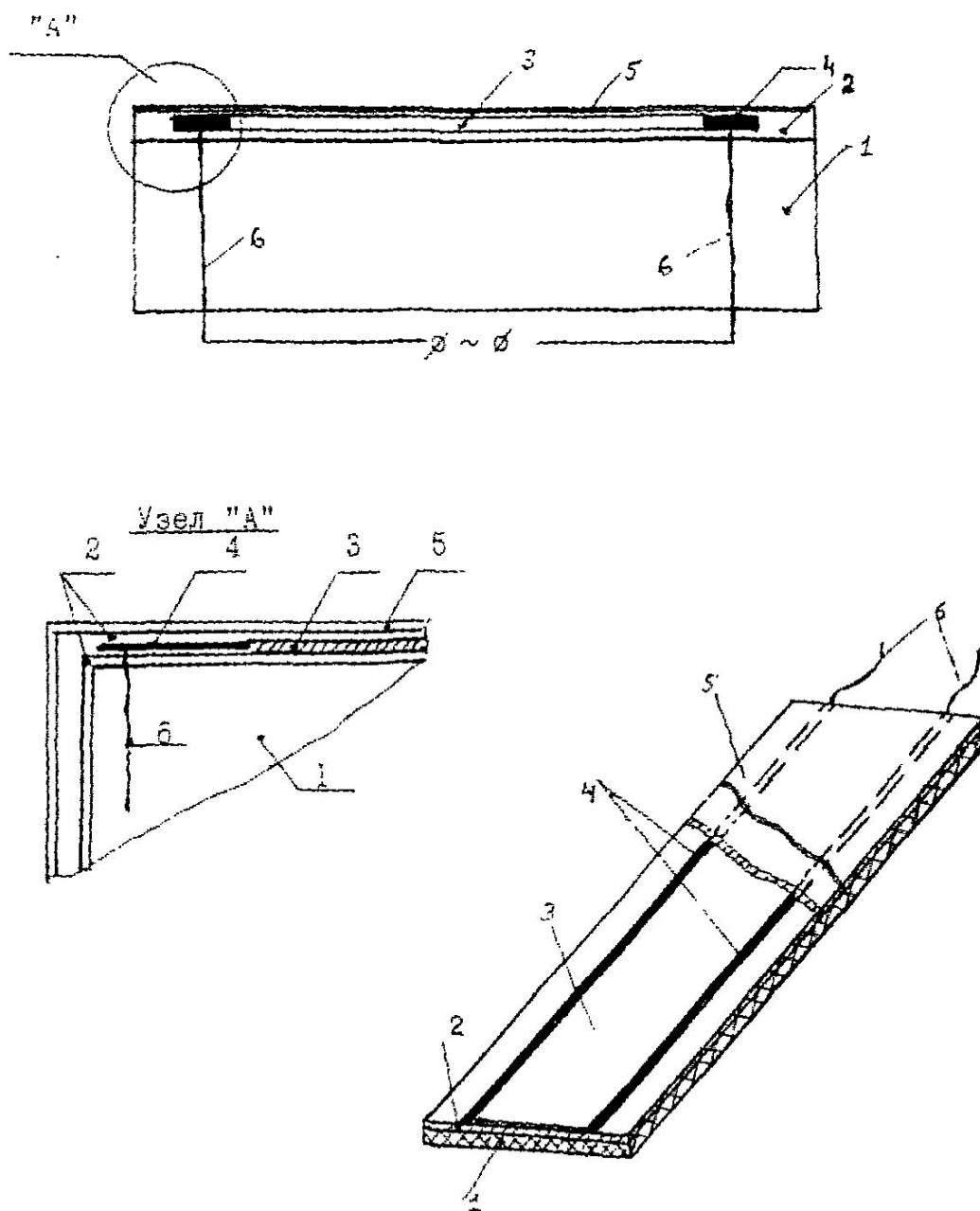


Рис. 6.12. Конструкция опалубочного щита с полимерным покрытием:
 1- водостойкая фанера; 2- электроизоляционный слой; 3- токопроводящий слой;
 4-токопроводящие электроконтакты; 5- защитный слой; 6- электрические
 провода

Таблица 6.8

Технические показатели полимерных покрытий

№№ п/п	Температура, °С	Удельное электрическое сопротивление	Температура размягчения, °С	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
1.	до -20	0,23	115	19	27
2.	-25	0,34	115	18,5	30
3.	-30	0,44	115	17	35
4.	-35	0,55	115	18	40

В качестве токопроводящих микронаполнителей, в полимерных композициях, следует применять только углеродные материалы – технический углерод (ацетиленовую сажу) и тонкомолотый графит. Использование металлических тонкодисперсных частиц не допустимо, т.к. они подвергаются окислению в используемых полимерных смолах, что приводит к существенному росту электрического сопротивления композиций с течением времени. Помимо этого, металлические частицы в недостаточной степени образуют цепочечные токопроводящие структуры с контактами между частицами или малым расстоянием между ними, через которые проскакивают электроны. Таким образом, металлические микрочастицы не обеспечивают необходимую величину проводимости композиции и ее стабильность во времени.

Коэффициент объемного температурного расширения отвержденных полимерных смол значительно больше, чем микрочастиц углеродного наполнителя. В результате при нагревании возникают напряжения растяжения в токопроводящих цепочках композиции и нарушение контактов между токопроводящими частицами, что вызывает увеличение удельного электрического сопротивления композиции. При использовании в качестве токопроводящего элемента токопроводящей бумаги и углеграфитовой ткани, указанное явление проявляется во много раз слабее, т.к. контакты в этих материалах обладают определенной стабильностью.

Необходимая равномерность температурного поля на контакте греющего покрытия с бетоном достигается только при использовании покрытий заводского изготовления. Это не исключает использования покрытий, изготавливаемых вручную, но при этом необходимо учитывать некоторое ухудшение показателей качества обогреваемого бетона и несколько повышенный расход электроэнергии.

§ 6.9. Конструкции инвентарных греющих гибких покрытий

При обогреве монолитного бетона, уложенного в дорожные основания и покрытия, в подготовки под полы, в стыки между сборными элементами, а также при отогреве мерзлых грунтовых и искусственных оснований рекомендуется применять инвентарные термоактивные гибкие покрытия или греющие маты (ТАГП).

Такое покрытие представляет собой легкое, гибкое, гидроизолированное нагревательное устройство, предназначенное для периферийного радиационно-конвективного или контактного обогрева различных видов бетонных и железобетонных конструкций с открытыми горизонтальными и вертикальными поверхностями при температуре наружного воздуха до минус 40⁰С. Максимальная температура обогрева должна быть не более 70⁰С.

Назначение термоактивных гибких покрытий различных видов, область и особенности их применения указаны в таблице 6.9.

Таблица 6.9

Гибкие термоактивные покрытия

Вид гибких электронагревательных устройств	Область применения
Гибкие термоактивные покрытия	Для обогрева свежесушеного бетона дорожных и аэродромных покрытий, бетонных оснований под полы межэтажных монолитных перекрытий промышленных и гражданских зданий, горизонтальных поверхностей фундаментов, вертикальных плоских и криволинейных поверхностей стен в комплексе со скользящей опалубкой и бетонных конструкций сложной конфигурации
Гибкие термоактивные полосовые покрытия	Для обогрева межконструкционных замоноличенных швов промышленных и гражданских зданий; для устранения мостиков холода в стыках жесткой греющей опалубки и сопряжений бетонопроводов
Гибкие термоэлектрические вкладки	Как греющие элементы в жесткой металлической опалубке
Полужесткие греющие опалубки	Для обогрева монолитных стыков колонн и сборных элементов несущего каркаса промышленных и гражданских зданий

В качестве электронагревателей в ТАГП применяются провода, углеродная ткань и ленты. При соответствующем технико-экономическом обосновании возможно применение проволочных нагревателей из металлов с высоким удельным омическим сопротивлением.

Греющие провод применяется марок ПОСХВ и ПОСХП диаметром 1,1мм; марки ПОСХВТ диаметром 1,4 мм (ТУ 16-505.526.73); марок ПВЖ и ППЖ диаметром 1,4-1,8 мм (ТУ КП 087-66). Максимально допустимая температура на поверхности изоляции для проводов ПОСХВ и ПОСХП – 70⁰С, ПОСХВТ – 105⁰С.

Условия работы провода ПВЖ – от минус 40⁰С до плюс 60⁰С, провода ППЖ – от минус 60⁰С до плюс 70⁰С.

Углеродная ткань применяется марки УУТ-2 (ТУ 6-06-492-75). Нагреватель ТАГП выбирается в зависимости от максимальной температуры обогрева и заданных рабочих параметров, может состоять из одной или нескольких групп нагревательных проводов или полос углеродной ткани, соединенных между собой в электрическую цепь последовательно, параллельно или в "звезду" и "треугольник".

Геометрические размеры, коммутационные крепежные устройства гибких ТАГП должны быть унифицированными, обеспечивающими возможность обогрева поверхности любой конфигурации. Они должны обеспечивать равномерный обогрев бетона при температуре не выше заданной по всей площади контакта с поверхностью бетона. В ТАГП недопустим перегрев нагревателя во время эксплуатации по причине быстрого окисления (сетчатые нагреватели), размягчения электроизоляции и температуры девулканизации резины.

Электропитание ТАГП рекомендуется производить от сети с напряжением, равным 40-90 В, через понижающие трансформаторы. Во избежание их перегрева и возгорания ТАГП запрещается при обогреве бетона устанавливать внахлест активной частью одного покрытия на теплоизоляцию другого; перекрытие покрытий одного другим следует производить только неактивной частью.

При эксплуатации и хранении во избежание повреждения греющих элементов (провода или углеродной ткани) на ТАГП запрещается ставить какие-либо тяжелые предметы или устройства.

Материалы для ТАГП должны быть теплостойкими (до 120⁰С), не выделять токсичных газов при нагревании и обладать необходимой гибкостью, прочностью и морозостойкостью.

- Прослоечную сырую резину следует применять толщиной не более 1 мм.
- Для армирования рабочего слоя резины используется стеклоткань, например, марки КТ-11 (ТУ 6-11-68-67).
- Коммутационная разводка ТАГП выполняется из гибких медных шнуров, например, марки ПЩ (ГОСТ 9125-74), сечением в 2-3 раза превышающим сечение греющего элемента.
- Для теплоизоляции ТАГП рекомендуется штапельное стекловолокно с экранирующим слоем из фольги (ГОСТ 10499-78), в качестве гидроизоляции применяется прорезиненная ткань (ГОСТ 9584-72).

Теплоизоляция ТАГП должна иметь коэффициент теплопередачи, не превышающий 3 Вт/м² · °С.

Для подвода к нагревателям электроэнергии каждый ТАГП оснащается кабельным вводом со штепсельным разъемом, рассчитанным на максимальную расчетную величину тока электронагревателей. Коммутационные соединения электронагревателей в ТАГП должны иметь плотный контакт, быть прочными и иметь минимальное омическое сопротивление. Рекомендуется выполнять их с помощью металлически накладок на заклепках или пайкой по предварительно обмедненным концам углеродных нагревателей. Сопротивление изоляции электронагревателей в покрытии должно быть не менее 2 МОм в нормальных условиях.

Конструкцией ТАГП должна быть предусмотрена возможность крепления их между собой и на вертикальных или наклонных поверхностях монолитных конструкций, подвергаемых обогреву.

Способы соединения электронагревателей в одно- или трехфазную цепь, а также линейные размеры ТАГП предопределяются удельным омическим сопротивлением применяемых углеродных электроматериалов и наличием необходимых понижающих трансформаторов. Масса одного ТАГП не должна быть более 30 кг.

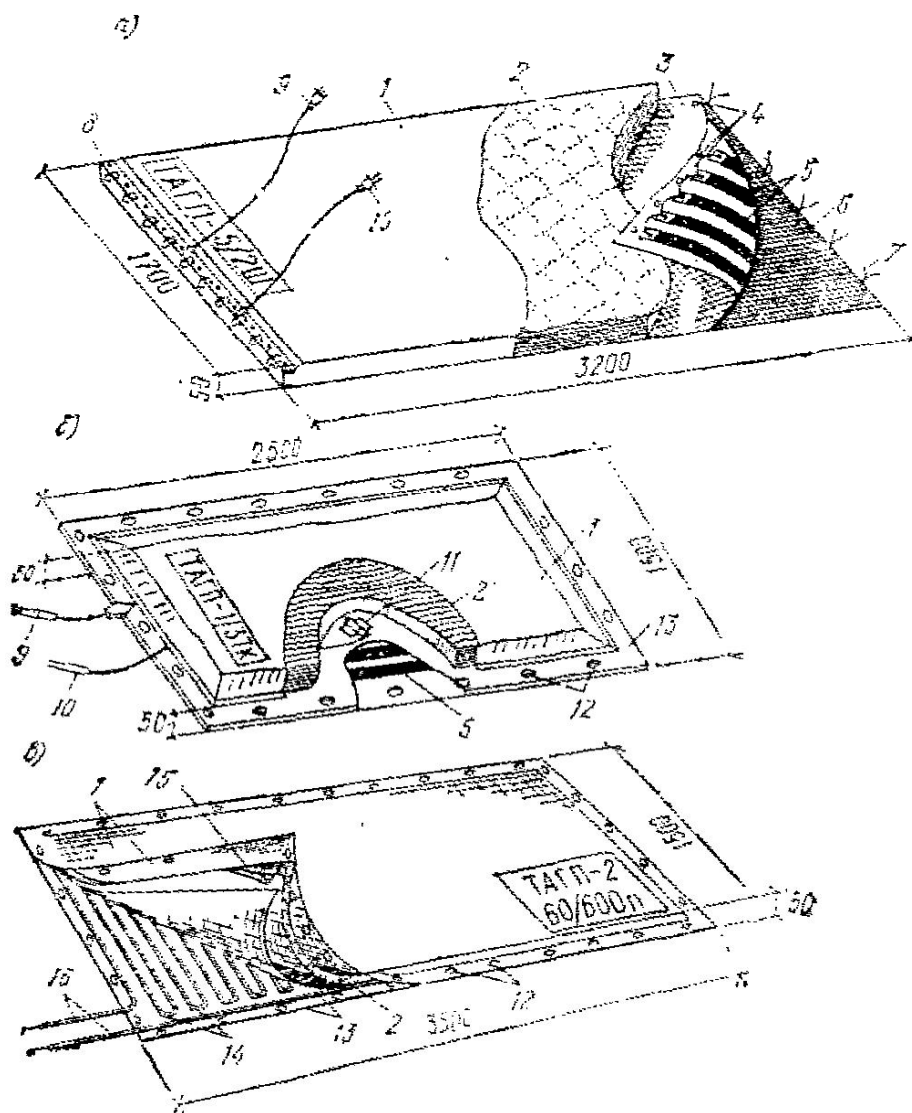


Рис. 6.13. Общие виды термоактивных гибких покрытий (ТАГП)

- а*- сборно-разборный швейный вариант; *б*- цельноклееный вариант; *в*- с греющим проводом ПОСХП; 1- защитный чехол; 2- утеплитель; 3- стеклохолст; 4- отверстия для крепления утеплителя; 5- углеродные ленточные электронагреватели; 6- стеклотканевая прокладка; 7- тесьма для крепления пакета утеплителя; 8- прижимные планки; 9 и 10- вилочные разъемы токопровода и датчика; 11- термоконтактор; 12- отверстия для крепления нагревателей; 13- листовая резина; 14- нагревательный провод; 15- алюминиевая фольга; 16- коммутационные выводы

Для защиты от перегрева каждый комплект ТАГП, рассчитанный на подключение к одному понижающему трансформатору, должен иметь один-два ТАГП с установленными в них датчиками температуры.

Конструкции, разработанные ЦНИИОМТП, предусматривают сборно-разборный швейный вариант со сменным защитным чехлом и неразборный клееный вариант ТАГП (рис. 6.13 а,б). Конструкция ТАГП со стальным изолированным проводом, разработанная Красноярским Промстройниипроектom (КПСНИИП), предусматривает цельноклееный вариант (рис. 6.13 в).

На наружной поверхности ТАГП необходимо стойкой несмываемой краской нанести маркировку с указанием основных электротехнических характеристик – рабочее напряжение, ток, электрическую мощность, омическое сопротивление.

§ 6.10. Гибкие греющие устройства из греющего провода с полимерной жилой

В практике производства работ имеется немало количество индивидуальных устройств по прогреву бетона. К ним относятся, в первую очередь, гибкие греющие устройства с использованием полимерного провода (коврики ленты, покрывала и др.), которые применяются для прогрева бетона в стыках сборных железобетонных конструкций.

Ниже представлены схемы устройств некоторых из них.

- *Гибкая греющая полоса* (рис. 6.14 а), представляет собой сшитый и собранный комплект греющего устройства для прогрева монолитных участков перекрытий, бетонных и цементных подготовок, стяжек полов, кровель, дорожных покрытий и других конструкций.

Принцип устройства заключается в раскладке и закреплении греющих проводов на термостойкую полимерную сетку (90 – 100°С) с шагом по расчету на температуру 60°С. Далее на сетку с обратной стороны закрепляется утепляющий слой из стекловолокнистых тканей или фольгированно-утепленное полотно. Собранный такой пакет вкладывается в специальный «мешок» из влагостойкой ткани. Концы подключающих проводов выводятся на наружную поверхность. Общая длина и ширина греющих устройств может быть различной. т.е. в зависимости от назначения и вида конструкции прогрева.

- *Греющая гибкая лента* (рис. 6.14 б), применяемая чаще для обогрева горизонтальных и вертикальных швов между плитами, панелями, а также в соединениях балок и колонн. где после зачеканки стык обёртывается этой полосой и включается ток для прогрева. Примерные схемы размещения показаны на рис.6.15.

- *Гибкий греющий жгут* (рис. 6.16), предназначен для прогрева наиболее узких и тонких швов омоноличивания и изготавливается длиной $3,0 \div 6,7$ м, в виде одножильных, двух и трехжильных устройств, обеспечивающих режим прогрева, соответственно $30 - 40^\circ \text{C}$; $50 - 60^\circ \text{C}$ и до 70°C . Они состоят из тепло- и электроизолирующей оболочки с размещенными внутри греющими проводами (1, 2, 3 шт.).

Прогрев бетона при омоноличивании стыков колонн может быть осуществлён, непосредственно греющим полимерным проводом который навивается на арматуру стыка. а затем, после укладки бетона в опалубку, на него подается ток.

После соединения арматуры путем ванной сварки стык способом торкрета заполняется бетоном (или раствором) соответствующей марки. Далее, после зачистки и выравнивания поверхности, стык укрывается специальным мягким греющим устройством длиной 2,0 м по подобию гибких греющих полос.

После укрытия и закрепления греющего устройства на колонне, подается ток напряжением 220 В и бетон в стыке выдерживается в режиме расчетных температур, соответствующих мягкому режиму термообработки ($40 - 50^\circ \text{C}$). За период 24 – 36 часов выдерживания в таком режиме прочность торкретируемого слоя достигает 60 – 70 % прочности от R_{28} .

Собранные результаты многих производственных работ и исследований по обогреву стыков с помощью гибких греющих устройств (табл. 6.10), дают основание рекомендовать их к использованию в более широких масштабах.

Продолжительность термообработки бетона в стыках сборных конструкций с использованием гибких греющих устройств из полимерного электропровода должна строго контролироваться и обусловлена технологией работ. В технологическом процессе необходимо учитывать режим прогрева в зависимости от объема прогреваемого бетона, требуемой его прочности и продолжительности прогрева.

§ 6.11. Монтаж и электроподключение нагревательных элементов в греющих опалубках и в гибких греющих устройствах

В греющих опалубках и различных гибких греющих устройствах следует применять только проверенные и испытанные под электронагрузкой нагреватели (табл. 6.11 и 6.12). Перед их монтажом проверяется внешним осмотром исправность изоляции, качество пайки подключающих проводков; по ведомости или цифровым данным на нагревателях указываются их мощности и рекомендуемое напряжение для использования. В связи с возможными отклонениями мощности нагревателей в пределах 3-8 Вт, целесообразно до монтажа их сгруппировать по несколько штук с тем, чтобы условно на 1 м^2 опалубки приходилась равная суммарная мощность. Это даст возможность, путем равномерной расстановки, избежать "перекоса фаз" в электросхеме и обеспечить в последующем более равномерный прогрев бетона.

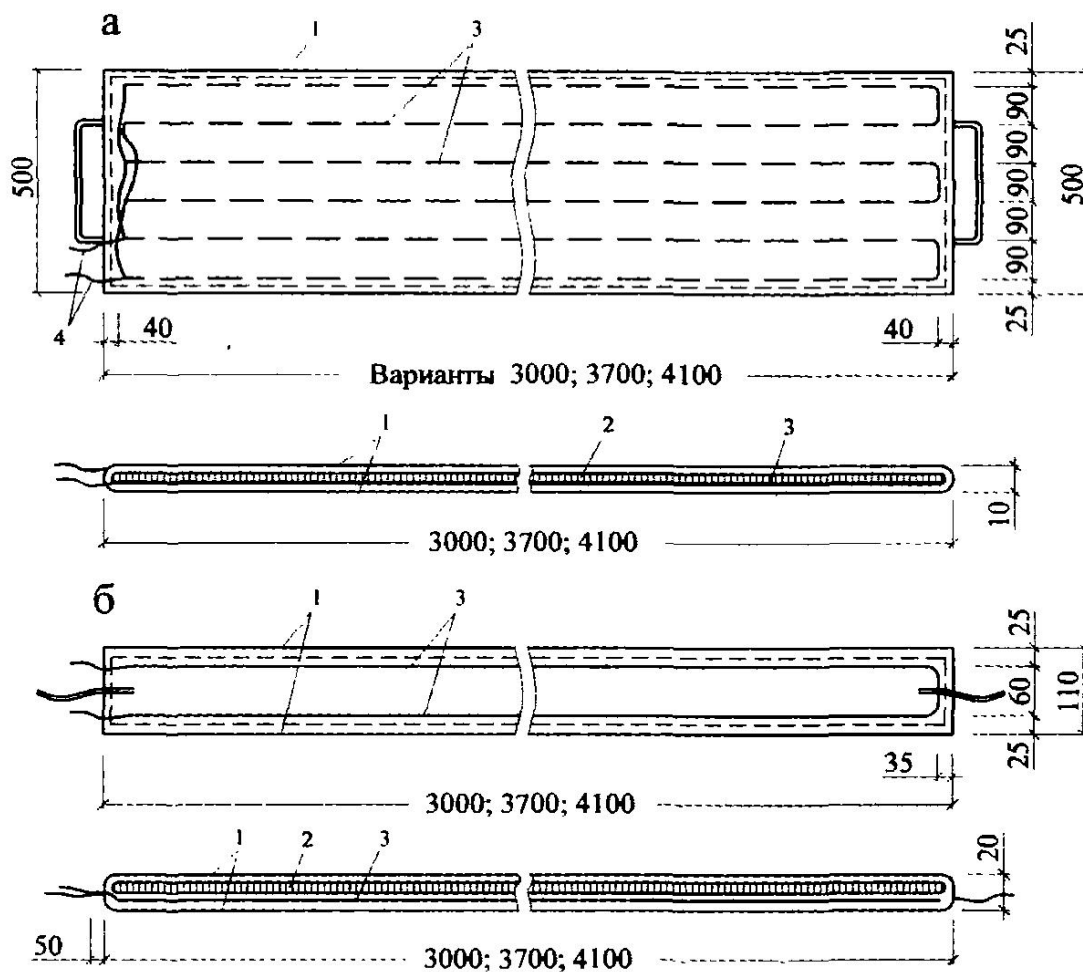


Рис. 6.14. Гибкая греющая полоса (а) и лента (б).

1 - мягкая обшивка; 2 - утепляющая прослойка; 3 - греющий полимерный провод; 4 - выводы для подключения питающих электропроводов.

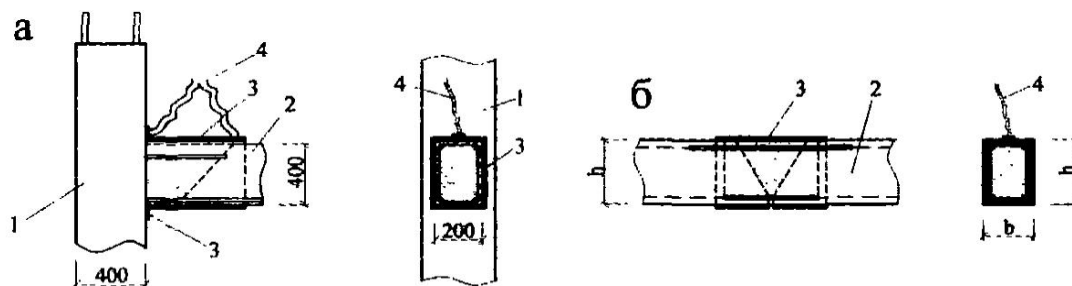


Рис. 6.15. Схема обогрева стыков гибкими нагревателями.

а - схема обогрева стыков колонн с балкой; б - схема обогрева стыка балок
 1 - колонна; 2 - балка; 3 - гибкий нагреватель; 4 - выводы для подключения питающих проводов.

Результаты прогрева стыков с использованием мягких греющих устройств

Наименование, вид греющего устройства	Наименование прогреваемых конструкций (стыков)	Характеристики испытаний		
		Температура в стыках, °С	Прочность, % при продолжительности прогрева, ч R/т	Мощность устройства, Вт
1	2	3	4	5
Гибкая греющая полоса размером 3700×500 (утепленная)	1. Монолитный участок в плитах перекрытия	48	$\frac{62}{32}$	270
То же размером 3700×500	2. Монолитный стык сборных колонн	54	$\frac{58}{28}$	180
Гибкая греющая лента размером 3000×110 (утепленная)	1. Монолитный стык балок с колоннами	50	$\frac{60}{30}$	90
	2. Стык между балками на сборных колоннах	52	$\frac{65}{31}$	90
Гибкий греющий жгут длиной 6700мм; диаметром 20мм	Стык швов между панелями стен	48	$\frac{56}{21}$	80
То же диаметром 40 мм	Стык между панелями перекрытий	60	$\frac{60}{23}$	160

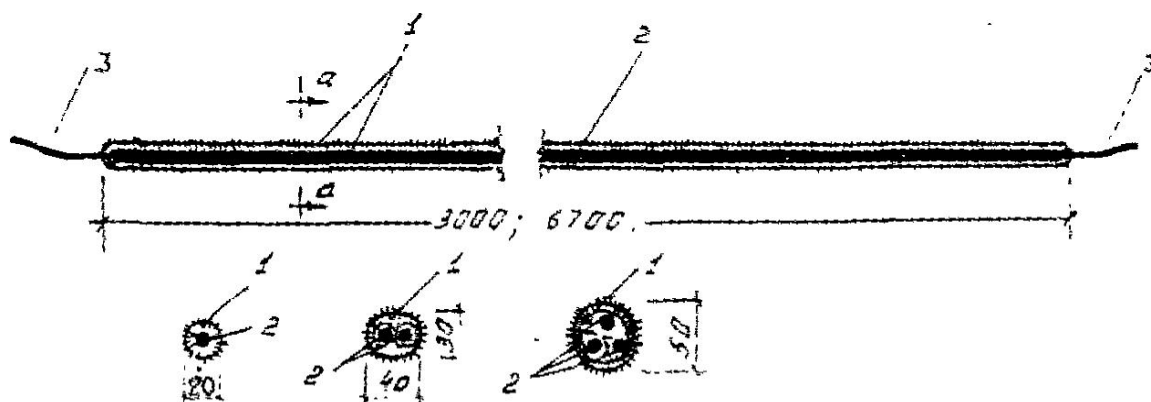


Рис. 6.16. Греющий жгут с разными жилами греющего провода:

- 1- ворсистый утеплитель; 2- греющий полимерный провод,
3- концы подключения

Таблица 6.11

**Допустимые нагрузки на провода и кабели с медными жилами,
в резиновой или полихлорвиниловой изоляции**

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Допустимые нагрузки, А
0,5	10
0,75	13
1,0	15
1,5	20
2,5	27
4,0	36
6,0	46
10	68
16	90
25	125
35	150
50	190
70	240
95	290
120	330

Примечание. Допустимые нагрузки на провода у кабели с алюминиевыми жилами принимаются равными 77% от нагрузок для соответствующих проводников с медными жилами.

Таблица 6.12

**Провода переносные шланговые легкие (ШПРЛ)
и средние (ШПРС, кабели ППШ, КРПТ, ГРШС) и другие**

Вид кабеля	Допускаемая нагрузка, при сечении токопроводящей жилы, в мм ²								
	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70
Одножильный	40	50	65	90	120	160	190	235	290
Двужильный	30	43	55	75	95	125	150	185	235
Трехжильный	28	36	45	60	80	105	130	160	200

Размещение электронагревателей на внешней стороне опалубки осуществляется равномерно, с одинаковым расстоянием друг от друга. Целесообразно, чтобы 0,5 площади щита металлической опалубки закрывалось нагревательными элементами. Это создает возможность равномерного прогрева бетона в стенах возводимых зданий на выбранных режимах. Закрепление нагревателей на опалубочных щитах может быть осуществлено любым доступным способом, обеспечивающим их плотное примыкание к поверхности опалубки и надежное крепление. В металлических опалубках, предназначенных для монолитного домостроения, целесообразно нагревательные элементы размещать в междуреберном пространстве с закреплением путем приварки металлических штырьков к ребрам жесткости. Подгибая эти штырьки к поверхности на-

гревателя, обеспечивается закрепление и плотное примыкание последних к опалубке. Отгибая в противоположную сторону, нагреватели, при необходимости, можно снимать.

При электроподключении нагревателей, их следует соединять (рис.6.17) по секционно между собой группами, в зависимости от сечения соединяющего провода, напряжения и мощности тока. От каждой группы осуществляется вывод на питающие электропровода при прогреве. Сечение подводящих проводов к щитам опалубки определяется, исходя из общей мощности включаемых групп нагревателей, объема прогреваемого бетона и режимов его прогрева. Ориентировочные данные приведены в табл. 6.11 и 6.12.

Индивидуально подбор проводов для подключения нагревателей или их групп можно провести следующим образом. Например, мощность одного нагревателя (W) составляет, согласно данным изготовителя-поставщика, 190 Вт, сопротивление $R = 18$ Ом, и рассчитан он на использование под напряжением 60 вольт. Отсюда сила тока в одном нагревателе составит:

$$I_1 = U/R = 60/18 = 3,3 \text{ ампер}$$

Исходя из этого значения, можно подобрать сечение провода для подключения одного электронагревателя. В данном примере достаточно сечение медного провода $0,5 \text{ мм}^2$.

Учитывая, что на одном щите опалубки, например, размещено 20 нагревателей, то для их совместного подключения к ведущему магистральному кабелю потребуется одножильный провод, выдерживающий нагрузку, равную

$$I_{\text{об}} = I_1 \times n = 3,3 \times 20 = 66 \text{ ампер}$$

По приведенным в таблице 6.11 данным мощностей определяется сечение провода, в данном случае медный, для этого потребуется провод сечением 10 мм^2 . В связи с тем, что в приведенном примере электропровода на нагревателях выполнены из медных проводков, то их подключение целесообразно осуществлять тоже медным проводом.

С внешней стороны нагревательные элементы и открытые поверхности опалубки покрываются теплоизоляционными материалами (пенополиуретан "Репор", минвата, минплита и др.), выдерживающими температуру нагрева элементов.

Толщина утепления определяется известными теплотехническими расчетами. Расчеты и имеющийся опыт производства работ по внедрению показывают, что с применением пенополиуретана слой утепления 20-30мм вполне обеспечивает необходимую теплоизоляцию при температуре среды до -20°C .

Перед нанесением теплоизоляции целесообразно провести испытание всей системы нагревательных элементов работой под током соответствующего напряжения, с целью проверки надежности нагрева, изоляции проводов и особенно контактов, в местах соединения проводов с нагревателями. Как при испытаниях, так и в условиях эксплуатации подача тока осуществляется через понижающий трансформатор с выдачей соответствующего напряжения. В качестве примера можно отметить положительную работу трансформаторов КТП-06-63 У1 и прогрев бетона нагревателями, работающими под напряжением 60 вольт.

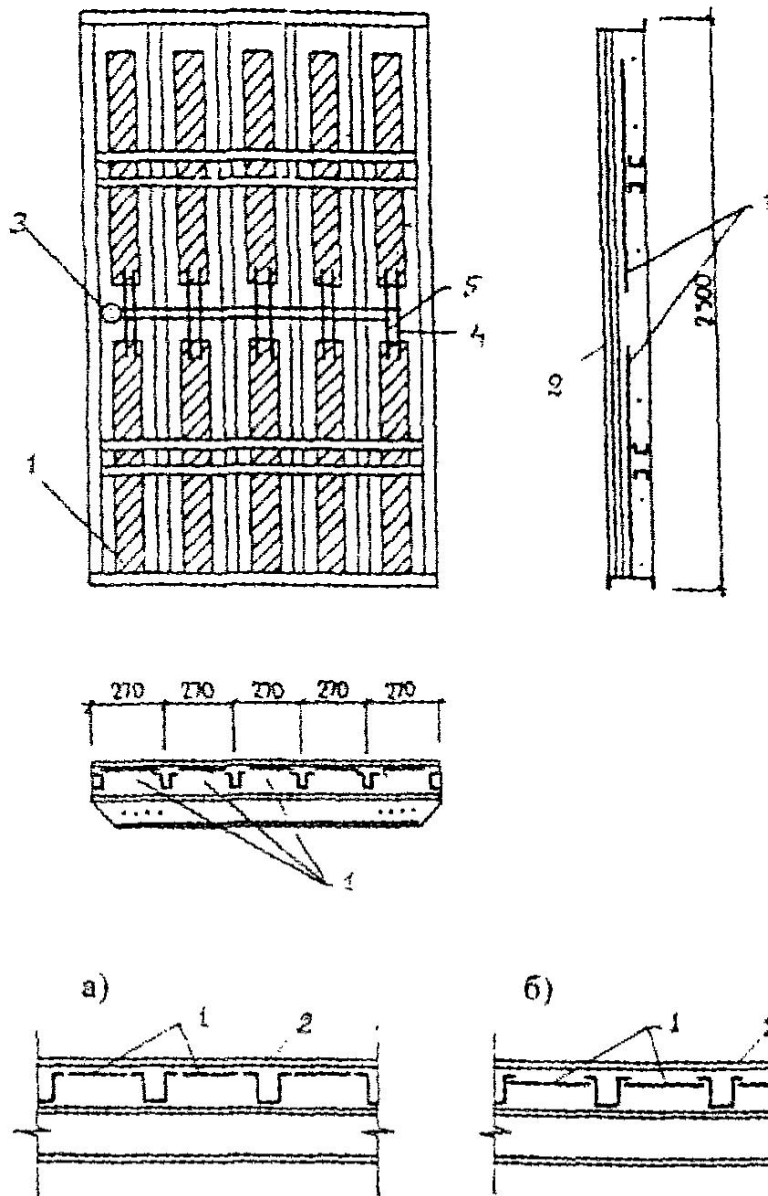


Рис. 6.17. Размещение и подключение нагревательных элементов в межреберном пространстве крупнощитовой опалубки.

а) и б) – варианты размещения нагревателя в опалубке
 1- нагреватели; 2- палуба опалубки; 3- розетка для подключения; 4- фаза; 5- н

Металлические нетоковедущие части трансформаторов, распределительных щитов, кожухи рубильников должны быть присоединены к нулевому проводу питающей сети отдельным изоляционным проводом, расположенном в общей резиновой оболочке с фазными проводами. Сечение защитного нулевого провода должно быть не менее 0,5 сечения фазных проводов.

Перед подачей напряжения на нагревательные элементы необходимо проверить правильность подключения нагревателей и наличие изоляции в местах подсоединения их к питающим проводам. Осмотреть всю систему электропроводки, состояние ограждения и убедиться, что в зоне ограждения нет людей, проверить перед бетонированием, путем пробного включения, работоспособность системы электроснабжения и регулирования, а также работу самих нагревателей на щитах опалубки с помощью токозамеряющих клещей.

В случае обнаружения, при подаче напряжения на щиты (также при прогреве) замыканий, перегрева проводов, искрения в контактах и других неисправностей, следует немедленно отключить напряжение и устранить их. Участки, где намечен прогрев бетона, должны быть обеспечены соответствующими плакатами электробезопасности и находиться под наблюдением электромонтеров, имеющих группу не ниже III. Персонал, осуществляющий производство работ по бетонированию или другие, находящиеся поблизости, инструктируются правилам безопасности и методам оказания первой помощи.

§ 6.12. Технология обогрева бетона в греющей опалубке и при применении греющих матов

Комплект термоактивной опалубки, находящейся в эксплуатации, должен быть обеспечен силовой аппаратурой электропитания с инвентарной электроразводкой и автоматическими устройствами контроля и регулирования температуры обогрева.

Электрическую мощность $P_{общ}$, необходимую для питания комплекта термоактивной опалубки, определяют по формуле

$$P_{общ} = \sum P_{уд}FK = \sum P_iK \quad (28)$$

где $P_i = P_{уд}F$ - средняя мощность нагревателей термоактивных щитов, находящихся ежедневно под нагрузкой, кВт;

$P_{уд}$ - удельная мощность нагревателей, Вт/м²;

F - площадь термоактивных щитов, находящихся ежедневно под нагрузкой, м²;

K - коэффициент, учитывающий отключение групп термоактивных щитов от сети по достижении расчетных температур, равный 0,85.

Части конструкций, не перекрытые термоактивной опалубкой, следует утеплять минерало- или стекловатными одеялами с коэффициентом теплопередачи не выше 2,85 Вт/м² · °С на длину не менее 1 м.

Перед установкой опалубки проверяется целостность изоляции электронагревателей и электрической разводки, соответствие омического сопротивления и удельной мощности нагревателей и опалубки паспортным данным, степень уплотнения и влажность утеплителя. Для просушки утеплителя до бетонирования опалубка подключается под напряжение на 3-4 ч. Целостность изоляции электронагревателей и коммутирующей разводки проверяется внешним осмотром, омическое сопротивление нагревателей – с помощью мегомметра, удельная мощность – ваттметром.

Транспортировать и хранить щиты греющей опалубки следует в вертикальном положении в кассетах или горизонтально в штабелях на деревянных прокладках высотой, превышающей на 30-40 мм высоту выступающих электрических разъемов. Коммутирующую разводку, клеммные коробки следует хранить в специальных шкафах.

Собранная опалубочная форма должна выступать над поверхностью бетона на 5-10 см. Открытые поверхности забетонированных конструкций следует защищать от влагопотерь пленкообразующими составами или другими влагонепроницаемыми материалами и утеплителем с коэффициентом теплопередачи не более $2,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Утеплитель с такими же теплоизолирующими свойствами рекомендуется применять для укрытия отогретых участков грунтовых, бетонных или других оснований, выступающих за наружные грани термоактивных опалубочных форм.

При модуле опалубливаемой поверхности менее 2 и высоте конструкции 1-1,5 м на открытые поверхности бетона при низких температурах воздуха рекомендуется укладывать термоактивные щиты или инвентарные термоактивные гибкие покрытия ТАГП (греющие маты) с удельной мощностью до 600 Вт/м^2 .

При скорости ветра, превышающей 12 м/с, рекомендуется опалубочные формы укрывать брезентом или воздухопроницаемой пленкой. Такие укрытия целесообразны для защиты опалубки от воздействия атмосферных осадков и позволяют уменьшить коэффициент теплопередачи греющих матов или термоактивных щитов на 20-30%.

При использовании в греющих щитах нагревателей из материалов с большим температурным коэффициентом электрического сопротивления (железо, латунь, никель и др.) пусковые токи достигают значительных величин (до $2,5 J_n$). Поэтому щиты во избежание нагрузки питающей электростанции следует включать отдельными группами площадью не более $40-50 \text{ м}^2$ с интервалом не менее 10 минут.

При коммутации термоактивной опалубки необходимо добиваться равномерной нагрузки на всех фазах. Коробки с клеммниками должны быть подвешены к схваткам или связям жесткости панелей на уровне не ниже 0,5 м от поверхности основания. При обогреве элементов каркасов – колонн, ригелей, балок – клеммные коробки подвешиваются к раздвижным струбцинам или верхнему ярусу хомутов колонн. При коммутации термоактивных щитов опалубки перекрытий клеммные коробки и кабели подвешиваются к раздвижным ригелям.

Режимы обогрева выбирают в зависимости от массивности возводимых конструкций с учетом обеспечения требуемой прочности бетона в зависимости от активности применяемого цемента, состава бетона, внешних условий и других факторов. При зимнем бетонировании после обогрева прочность бетонных конструкций должно быть не менее 50-60% R_{28} .

При изменении каких-либо компонентов в бетонной смеси, строительная лаборатория должна при первом опытно бетонировании и обогреве сопоставить расчетные и фактические режимы и внести необходимые коррективы в расчеты.

Применительно к бетонной смеси и бетону с объемной теплоемкостью $2,5 \cdot 10^3$ кДж/м³ · °С для теплотехнических расчетов ориентировочно можно пользоваться данными таблицы 6.13.

Таблица 6.13

Теплопроводность бетона раннего возраста

Материал	Объемная масса, кг/м ³	Теплопроводность, λ_0 , Вт/(м·°С)
Бетонная смесь с осадкой конуса 2-6 см в возрасте до 3 ч	2500	3,7
Бетон в возрасте до 12 ч	2480	2,8
То же, более 12 ч	2400	1,86

При выдерживании бетона в греющей опалубке скорость подъема температуры, максимально допустимая температура и скорость охлаждения (по замерам на поверхности конструкций) в зависимости от модуля опалубливаемой поверхности $M_{оп}$ ориентировочно можно принимать по данным таблицы 6.14.

Таблица 6.14

Показатели	Модуль опалубливаемой поверхности, м ⁻¹				
	4	6	8	10	более 10
Максимальная скорость подъема температуры на поверхности конструкции, °С/ч	5	5	6	8	10
Максимальная температура на поверхности конструкции, °С	40	50	60	70	75
Максимальная скорость охлаждения конструкции, °С/ч	5	5	6	8	10

Контролируемыми параметрами при обогреве является температура на палубе щитов и продолжительность обогрева.

Для повышения оборачиваемости термоактивной опалубки допускается ее демонтаж после изотермического выдерживания бетона, если это позволяет его прочность. Процесс остывания конструкций должен протекать под укрытиями из теплоизоляционных материалов (минераловатные одеяла и т.п.).

При отказе в работе нагревателей отдельных щитов должно быть обеспечено дополнительное утепление снаружи этих щитов. По окончании обогрева щит, отказавший в работе, должен быть изъят из опалубочной панели или блока и отремонтирован в мастерских. При аварийном прекращении подачи

электроэнергии устанавливается контроль за температурой бетона в конструкции. Время выдержки бетона при фактической температуре должно учитываться в теплотехнических расчетах и в расчетах времени дальнейшей тепловой обработки. Если перерыв в подаче электроэнергии произошел в момент укладки бетонной смеси, должны быть приняты меры по предотвращению замораживания бетонной смеси. С этой целью под брезентовое или пленочное укрытие опалубочной формы или в инвентарный тепляк подается теплый воздух от теплогенераторов. Желательно для таких случаев, на объекте иметь передвижную станцию мощностью до 200 кВт.

Укладку бетонной смеси целесообразно производить в предварительно подогретую опалубку. Предварительный нагрев опалубки позволяет сократить сроки обогрева, снизить деформативные напряжения в бетоне и опалубке, отогреть арматуру и повысить температуру основания (старого бетона).

В связи с разными условиями обогрева бетона стен, перекрытий (при одновременном их обогреве) целесообразно независимое подключение горизонтальных и боковых щитов с автономным, независимым температурным контролем и регулированием.

Перед установкой греющих матов открытая поверхность бетона укрывается пленкой и по ней маты укладываются вплотную друг к другу.

При температурах наружного воздуха до -40°C и толщине бетона перекрытия (или покрытия) свыше 300 мм можно применять комбинированный обогрев (греющие маты и нагревательные провода, закладываемые в бетон). Бетонная смесь укладывается с температурой не менее 10°C на всю толщину основания (или перекрытия). Открытая поверхность бетона укрывается пленкой, по ней вплотную друг к другу устанавливают греющие маты. Электропитание греющих проводов и матов осуществляется через понижающий трансформатор и ведется обогрев продолжительностью, обусловленной технологией работ.

§ 6.13. Обогрев бетона при возведении специальных монолитных конструкций в скользящей опалубке

При скорости возведения специальных монолитных железобетонных сооружений в скользящей опалубке рекомендуется использовать для целей обогрева термоактивное подвесное покрытие (ТАПП), что дает возможность разделить операции по укладке и выдерживанию бетона в конструкции. С помощью ТАПП осуществляют периферийный радиационно-конвективный обогрев распалубленного бетона и выдерживание его при температуре $50-70^{\circ}\text{C}$ до набора требуемой проектной прочности.

ТАПП представляет собой гибкое, легкое, паронепроницаемое нагревательное устройство, секционированное на отдельные элементы и устанавливаемое в непосредственной близости (0-50 мм) от поверхности распалубленного бетона сразу после передвижения щитов опалубки либо с технологическим разрывом по высоте для выполнения операций по затирке поверхности и нанесению полимерных покрытий (высота зоны затирки составляет 0,3-0,5 м).

В зависимости от условий производства работ целесообразно применение ТАПП в комплексе с другими методами тепловой обработки бетона: предварительным разогревом бетонных смесей, обогревом горячим воздухом и т.п.

При скоростном строительстве в скользящей опалубке рекомендуется применять двухсторонний обогрев стенок сооружений с установкой ТАПП на наружных и внутренних бетонных поверхностях конструкции (рис. 6.18).

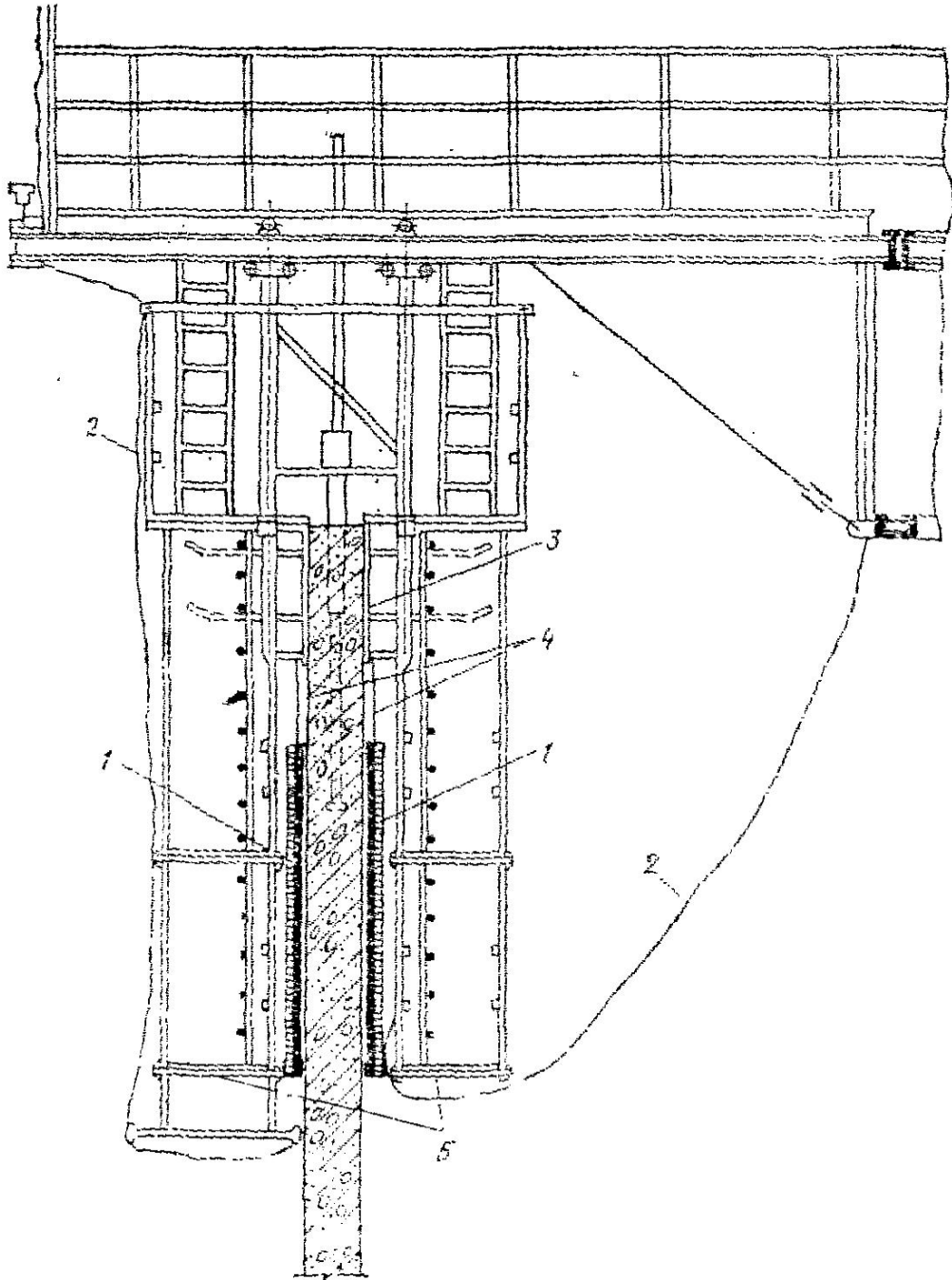


Рис. 6.18. Схема возведения трубы с применением термоактивных подвесных покрытий

1- ТАПП; 2- брезентовое укрытие; 3- скользящая опалубка; 4- подвеска ТАПП; 5- подвесные леса

Рекомендуется собирать ТАПП из отдельных элементов шириной 0,8-0,9м. Длина ТАПП является основным фактором обеспечения требуемых режимов выдерживания бетона и зависит от максимальной расчетной скорости возведения сооружения и сроков набора прочности бетона до требуемого значения.

Каждый элемент ТАПП состоит из нагревателя, теплозащитного слоя, наружной оболочки и может иметь разнообразное конструктивное оформление. Следует стремиться к использованию ТАПП заводского изготовления.

Электроснабжение ТАПП осуществляется от отдельной КТП через распределительные пункты, установленные на рабочей площадке. Для электроснабжения ТАПП рекомендуется использовать сетевое напряжение 220 В. Каждый элемент подсоединяется по параллельной схеме.

Ориентировочная величина удельной мощности нагревателя ТАПП определяется по формуле

$$P_{\lambda, \Delta} = 0,4 + 0,065 \frac{\lambda}{\Delta}, \quad \text{кВт/м}^2 \quad (29)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала теплозащитного слоя, Вт/м · °С; Δ - толщина теплозащитного слоя, м.

Данные мощности и длины ТАПП в зависимости от требуемой конечной прочности бетона приведены в таблице 6.15.

Все элементы ТАПП должны иметь маркировку с указанием порядкового номера, номера распределительного пункта и др. в схеме электроснабжения. Обозначения наносят стойкой, несмываемой краской на наружной поверхности оболочки.

Подвеска элементов ТАПП должна удовлетворять требованиям удобства монтажа и демонтажа и обеспечить равномерное, без перекосов, расположение элементов у обогреваемых бетонных поверхностей. Элементы ТАПП закрепляются верхним торцом на специальных металлических конструкциях – бандажах. В конструкции подвески следует предусматривать регулируемое прижатие бандажей к поверхности бетона. Бандажи могут быть изготовлены из труб диаметром 25-38 мм и удерживаться тросовыми подвесками на несущих металлических конструкциях рабочей площадки или домкратом рам.

Нижние торцы элементов ТАПП на наружной поверхности сооружения закрепляют обжимным тросом, а на внутренней поверхности – распорным кольцом. Распорные кольца могут быть изготовлены из арматурной стали диаметром 12-14 мм, соединенных сжимами.

Боковые поверхности ТАПП соединяются быстроразъемными соединениями либо в крайнем случае уплотнены установкой внахлестку с шириной перекрываемой полосы около 100 мм.

Элементы ТАПП подают в свернутом виде на подвесные леса, разворачивают и в порядке, указанном маркировкой, от условной точки вывешивают на бандажные кольца внутри и снаружи сооружения.

Для электроснабжения ТАПП рекомендуется использовать сетевое напряжение 220 В переменного тока промышленной частоты. Подача электроэнергии на рабочую площадку и местные разводки выполняется шланговыми кабелями КРПТ, ГРСШ и т.п. Подключение элементов ТАПП (не более трех)

производится через автоматические выключатели, устанавливаемые на внутренние ограждения подвесных лесов.

Вертикальную прокладку силовых кабелей от КТП осуществляют по внешнему периметру сооружения путем подвески на тросе диаметром не менее 10 мм до нижнего яруса наружных подвесных лесов. Запас кабеля укладывают на нулевой отметке у стены сооружения и защищают от повреждения деревянным коробом.

Непрерывное производство работ в расчетном режиме не требует изменения мощности нагревателей ТАПП. Регулирование температуры обогрева бетона при перерывах в бетонировании может осуществляться включением и выключением нагревателей. Для поддержания температуры рекомендуется использование автоматических систем.

Таблица 6.15

Мощность ТАПП в зависимости от требуемой прочности бетона

Температура наружного воздуха, t''_B , °C	Начальная температура бетона, t''_K , °C	Толщина конструкции 0,4 м				Толщина конструкции 0,2 м			
		Скорость бетонирования, м/сут.							
		3		5		3		5	
		Длина ТАПП, м							
		4	6	4	6	4	6	4	6
-20	+20	<u>0,8</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>
		60	50	30	40	55	45	30	30
-10	+10*	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>
		40	35	30	35	45	55	35	40
0	+20*	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>
		50	55	40	47	50	58	40	45
	+10	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>
		51	65	35	50	60	68	50	56
+20	<u>0,25</u>	-	-	<u>0,25</u>	<u>0,25</u>	-	-	<u>0,25</u>	
	31			30	28			27	
-20	+10*	<u>0,9</u>	<u>0,8</u>	<u>1,2</u>	<u>1,0</u>	<u>1,0</u>	<u>0,8</u>	<u>1,2</u>	<u>1,0</u>
		70	71	78	70	77	70	76	70
-10	+10*	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>	<u>0,85</u>	<u>0,85</u>	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>	<u>0,9</u>	<u>0,8</u>
		73	75	70	72	78	77	71	74
	+10*	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>	<u>0,8</u>	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>	<u>0,7</u>	<u>0,9</u>	<u>0,7</u>
		78	80	70	71	71	82	76	70
0	+10	<u>0,7</u>	<u>0,6</u>	<u>0,9</u>	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>	<u>0,6</u>	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>
		71	73	73	74	76	78	70	73
	+20	<u>0,6</u>	<u>0,6</u>	<u>0,9</u>	<u>0,8</u>	<u>0,6</u>	<u>0,5</u>	<u>0,8</u>	<u>0,7</u>
		70	78	77	78	71	72	75	77
+40	+20	<u>0,08</u>	<u>0,08</u>	<u>0,16</u>	<u>0,06</u>	<u>0,08</u>	<u>0,08</u>	<u>0,16</u>	<u>0,08</u>
		62	71	52	57	64	72	53	56

* Рекомендуется обогревать в греющей опалубке мощностью 0,3 кВт.

Примечание. В числителе – удельная мощность ТАПП, кВт/м²; в знаменателе – прочность бетона после выхода из нижней зоны ТАПП, % R₂₈.

§ 6.14. Производство работ по прогреву бетона в греющей опалубке.

Технологическая последовательность выполняемых работ при возведении монолитных конструкций с использованием греющей опалубки, оснащенной инвентарными нагревательными элементами на основе углеродистой ткани заключается в нижеследующем.

Щиты опалубки устанавливаются и раскрепляются в проектное положение. Электровыводы от щитов соединяются в единую цепь, проверяется правильность и надежность их соединения, в том числе включением тока соответствующего напряжения. При этом обеспечивается частичный нагрев опалубки до 15-20 °С, чем обеспечивается растаивание образовавшегося снега и льда.

Укладка бетонной смеси и ее уплотнение в соответствии с мероприятиями, предусмотренными в проекте производства работ осуществляется при отключенном напряжении. В соответствующих местах (углах, на поверхности бетона, снизу) оставляются скважины для установки датчиков замера температуры.

Если позволяют температурные условия, целесообразно, недопуская замораживания смеси, выдержать ее без прогрева (1-2 ч.) с тем, чтобы произошло более глубокое взаимодействие цемента с водой, обеспечивающее в процессе термообработки интенсивное твердение и возрастающее тепловыделение от экзотермии.

После повторной проверки правильности электроподключения, осуществляется включение на прогрев бетона. Это можно проводить на высоких (60-80°С) и низких температурах (30-50°С) прогрева. Менее безопасными и надежными являются низкие температуры.

При возведении стен высотных жилых зданий толщиной 500 мм целесообразно осуществлять двухсторонний обогрев, а для перегородок толщиной до 200 мм можно допустить односторонний обогрев. Однако не обогреваемая опалубка должна соответственно утепляться.

Расчет параметров прогрева бетона следует проводить аналогично примеру, приведенному ниже. Например, требуется прогреть бетон, уложенный в опалубку стен толщиной 50 см. Начальная его температура перед прогревом составляла $t_n = 10^\circ\text{C}$. Для этого выбирается, например, четырехстадийная схема: выдерживание до начала прогрева, подъем температуры, прогрев и остывание.

Вначале осуществляется выдерживание бетона перед прогревом в течение 1-3 ч при низкой положительной температуре, после укладки. Затем намечается, что подъем температуры в бетоне будет осуществляться со скоростью (V_3), не превышающей 10°C в час до максимального значения $t_n = 50^\circ\text{C}$., т.е. прогрев по мягкому режиму в целях исключения трещинообразования в бетоне.

Далее принимается, что режим изотермического прогрева бетона будет осуществляться по максимальной температуре (t_n), равной 50°C . Исходя из этого, время подъема температуры ($T_{\text{под}}$) определится из частного от деления разности температур изотермического прогрева (t_n) и начальной температуры (t_n) бетона на величину скорости подъема температуры (V_n):

$$T_{\text{пок}} = \left(\frac{t_n - t_n}{V_{\text{пок}}} \right) = \left(\frac{50 - 10}{10} \right) = 4 \text{ часа}$$

По графику, приведенному на рис.6.19, определяется продолжительность изотермического прогрева, для достижения бетоном заданной прочности. Например, требуется, чтобы она была не ниже 50% от R_{28} при прогреве при температуре 50°C . Для этого на графике по кривой, характеризующей эту температуру (кривая 2), находится точка пересечения этой кривой с горизонталью, характеризующей значение прочности на шкале, равной 50%. Из этой точки опускается перпендикуляр на горизонтальную шкалу и получается значение продолжительности прогрева, равной 10 ч. Из этого графика также не трудно заметить, что, при более высокой температуре изотермического прогрева, такую же прочность можно получить в более короткие сроки.

Закончив прогрев, необходимо, не снимая опалубки, дать возможность бетону остыть до температуры $+15...+20^{\circ}\text{C}$ по возможности с меньшей скоростью, но не более $15-20^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. В приведенном примере это должно произойти за два часа. Таким образом, начиная от окончания укладки до начала распалубки, общая продолжительность термообработки составит 16 ч., т.е. 4 ч. выдерживание, 10 ч. изотермический прогрев, 2 ч. остывание. Общую продолжительность термообработки можно сократить за счет совмещения процесса выдерживания и укладки, повышения температуры прогрева. Например, повышая температуру прогрева до 70°C , и снижая выдерживание на 2 часа, общая продолжительность термообработки сократится на 5 часов и составит $2 + 7 + 2,5 = 11,5$ часа.

В период термообработки необходимо осуществлять контроль за температурой прогрева, снимая результаты замера температур и записывая их в журнал прогрева:

- в период подъема температуры через 30-60 минут;
- в период прогрева - через 60-90 минут;
- при остывании - 1 -раз в смену.

При обнаружении нарушений режима прогрева надо принимать соответствующие меры. Например, при перегреве бетона периодически отключать ток, при падении температуры принимать меры к усилению прогрева, в т.ч. повышением напряжения.

В период термообработки могут быть отклонения фактических значений температур от расчетных. В этих случаях достигнутую прочность в прогретом бетоне можно определить обратным ходом расчета по данным температур. Например, температура изотермического прогрева (t_n) была 45°C , период прогрева составил 9 ч. Тогда на графике (рис.6.19) из значения продолжительности прогрева, равного 9 ч., проводится условно линия вертикально вверх до пересечения с точкой значения температуры 45°C , которая находится в середине между кривыми, характеризующими температуру 40 и 50°C . Далее из этой точки по горизонтали проводится линия до пересечения со шкалой прочности. В результате получается, что прочность бетона при таком режиме прогрева будет равна 45% от R_{28} .

До снятия опалубки необходимо провести отсоединение всех подводящих электропроводов (при отключенном токе), убрать и сложить их в отведенном месте. Конечно же, снятие опалубки и ее перестановка должны осуществляться осторожно, без нарушений целостности нагревательных систем и забетонированной конструкции. Обнаруженные дефекты в бетоне устраняются в соответствии с действующими нормативными документами СНиП.

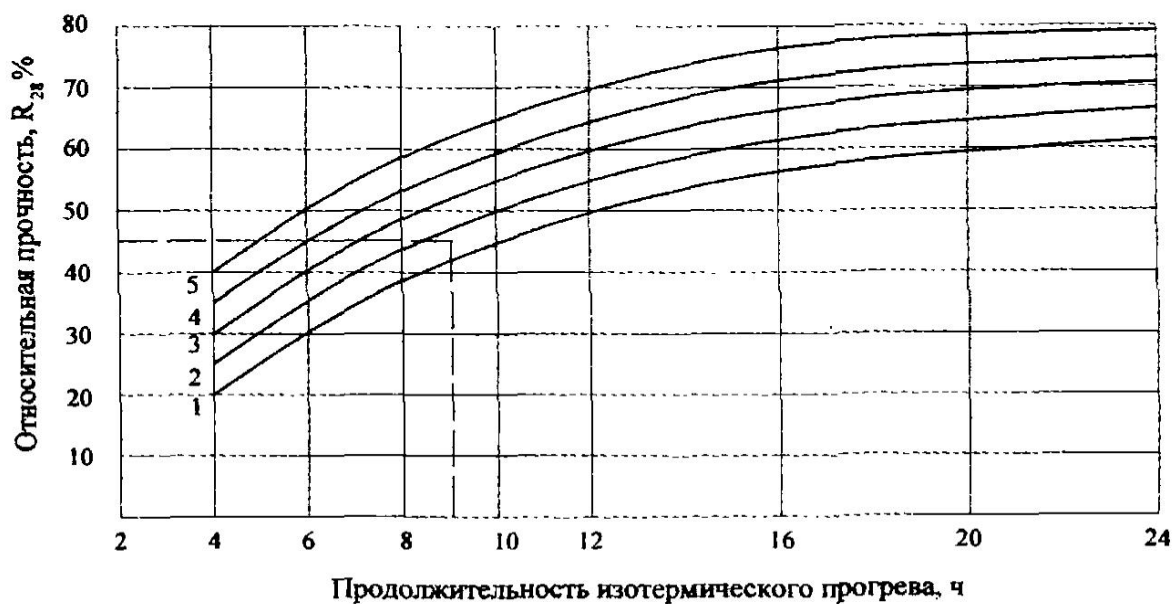


Рис. 6.19. Зависимость относительной прочности бетона от температуры и продолжительности изотермического прогрева.

1 - $t_{пр} = 40^{\circ}\text{C}$; 2 - $t_{пр} = 50^{\circ}\text{C}$; 3 - $t_{пр} = 60^{\circ}\text{C}$; 4 - $t_{пр} = 70^{\circ}\text{C}$; 5 - $t_{пр} = 80^{\circ}\text{C}$.

Пример расчёта и конструирования греющего элемента на тканевой основе для оснащения опалубки

Рассмотрим конкретный пример прогрева бетона в греющей опалубке. Задано: размеры греющего элемента, исходя из формы опалубки составляют: $l=1150$ мм, $a=200$ мм. Напряжение тока 60 В. Принимаем, что температура на поверхности опалубки должна быть $60 - 70^\circ$ С.

Площадь греющего элемента составит:

$$S = l \times a = 1150 \times 200 = 230\,000 \text{ мм}^2 \text{ или } 230^* \text{ см}^2$$

Выбираем из справочных данных или по номограмме (рис.6,8), что при нагреве элемента до 70° С, удельная мощность $\rho_{70} = 0,08 \text{ Вт/см}^2$ или $\rho_{100}=0,08 \text{ Вт/см}^2$.

Отсюда общая мощность нагревателя для этого случая должна составить:

$$\left. \begin{aligned} P_{70} &= 0,08 \times 2\,300 = 184 \text{ Вт} \\ P_{100} &= 0,13 \times 2\,300 = 299 \text{ Вт} \end{aligned} \right\} \text{ Принимаем } P = 250 \pm 50 \text{ Вт.}$$

Допустим, что из условия технологичности монтажа и снижения удельного электросопротивления принимаем, что конструктивно нагревательный элемент будет состоять из двух тканевых полос, соединенных последовательно. С учётом изоляционного расстояния (полосы) от края элемента по 3,5 см получим, что размеры элемента будут равны: $l=230$ см, $b=3,5 \times 2 = 7,0$ см.

Общее сопротивление нагревателя составит :

$$R_{200} = U^2/P = 60^2/200 = 18,0 \text{ Ом для } W=200 \text{ Вт}$$

$$\text{или } R_{300} = 60^2/300 = 12,0 \text{ Ом для } W=300 \text{ Вт.}$$

Среднее сопротивление составит: $R_{\text{ср}} = 15 \pm 3$ Ом.

Удельное поверхностное электросопротивление соответственно будет равно:

$$\text{при } R = 12 \text{ Ом } \rho_{300} = \frac{12 \times 7}{222} = 0,376 \text{ т.е. } \sim 0,4 \text{ Ом,}$$

$$\text{при } R = 18 \text{ Ом } \rho_{200} = \frac{18 \times 7}{220} = 0,566 \text{ т.е. } \sim 0,6 \text{ Ом}$$

Таким образом получили, что для изготовления требуемого нагревателя необходимо использовать углеродистую ткань марки УТ-2 с удельным сопротивлением $\rho = 0,4 \div 0,6$ Ом. Это и принимаем при конструировании.

При проектировании может возникнуть другая задача, например, по известным параметрам мощности и напряжения требуется определить (габариты) размеры нагревательного элемента и другие.

В этом случае по приведенным формулам, обратным ходом, можно определить их.

Для упрощения расчетов, можно пользоваться номограммой, представленной на рис.6.8, графически. Пример пользования номограммой приведен в §6.7.

Глава 7. ВОЗДУШНЫЙ КОНВЕКТИВНЫЙ ПРОГРЕВ МОНОЛИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 7-1. Сущность метода и разновидности конвективного прогрева

Наиболее распространенным способом термообработки бетона тонкостенных конструкций ($M_n > 10$), возводимых в различных опалубках, является конвективный прогрев, что объясняется его универсальностью, низкой трудоемкостью и возможностью комбинирования с другими методами.

Методы конвективного прогрева классифицируются по принципу подведения теплового потока к прогреваемой конструкции, и разделяются на «традиционный» камерный прогрев, «камерный прогрев с воздуховодами» и «конвективный прогрев с приопалубочными шторами».

При «традиционном» камерном прогреве тепловой поток от теплогенератора подается в замкнутый объем тоннеля* и далее, вследствие конвективного теплообмена, происходит нагревание внутренних опалубочных щитов (рис. 7.1).

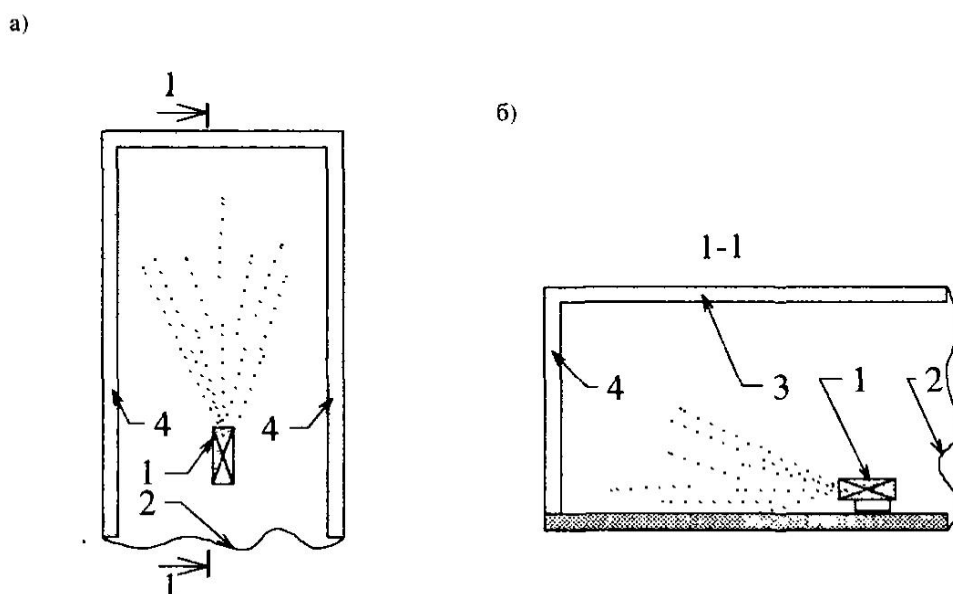


Рис. 7.1. Схема «традиционного» камерного прогрева:
1—теплогенератор; 2—теплоизолирующая штора; 3—перекрытие;
4—стены

Открытые вертикальные поверхности закрываются теплоизолирующими шторами, а в образованный таким способом замкнутый объем устанавливают теплогенераторы и подается нагретый воздух. Передача тепла от теплогенератора к поверхности опалубки осуществляется конвекцией. Далее за счет теплопроводности бетона происходит нагрев внутренних слоев возводимой конструкции. Наружные опалубочные щиты утепляются эффективными теплоизолирующими материалами, либо используются термоактивные маты.

При «камерном прогреве с воздуховодами» тепловой поток от теплогенератора поступает в распределитель и далее в воздуховоды по периметру возводимых конструкций стен (рис. 7.2).

*) Термин «тоннель» в данном разделе применяется для обозначения прогреваемого пространства

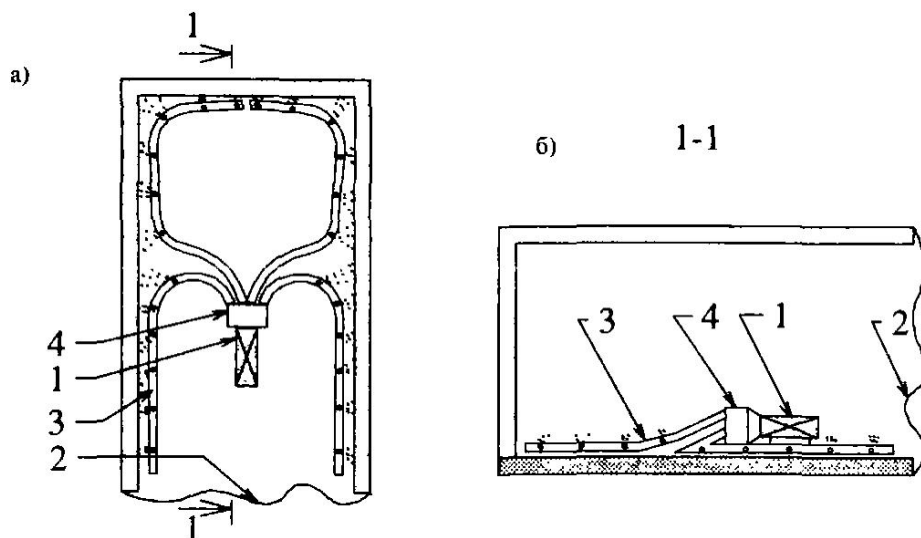


Рис. 7.2. Схема «камерного прогрева с воздуховодами»
 1—теплогенератор; 2—теплоизолирующая штора;
 3—воздуховоды; 4—распределитель воздушного потока

«Конвективный прогрев с приопалубочными шторами»^{*)}, основан на передаче теплового потока от теплогенератора в область, ограниченную теплоизолирующей шторой и щитами опалубки (рис. 7.3), в результате чего уменьшается объем прогреваемого воздушного пространства граничащего с опалубкой и повышается эффективность передачи тепла бетону.

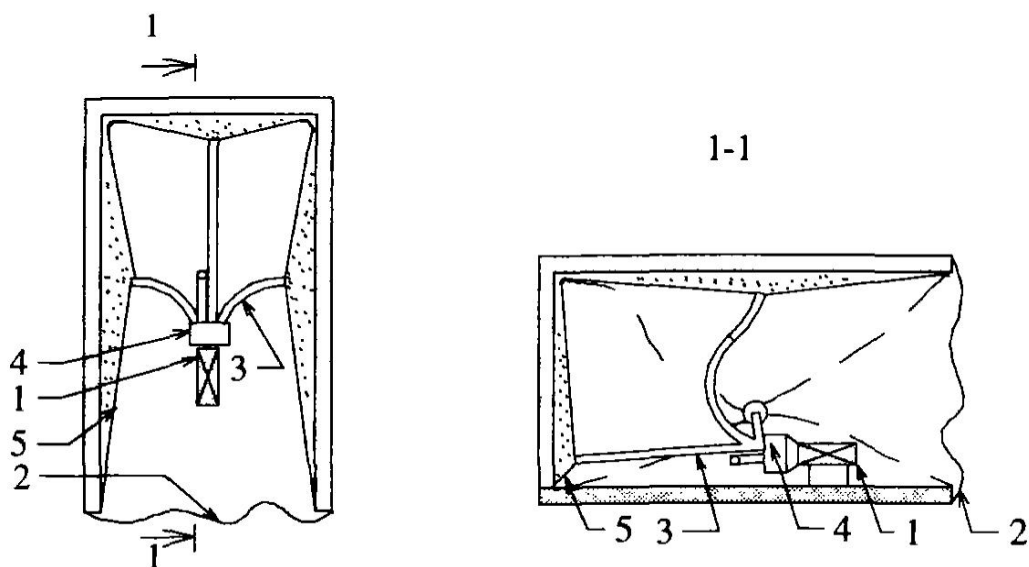


Рис. 7.3. Схема «конвективного прогрева с приопалубочными шторами»: 1—теплогенератор; 2—теплоизолирующая штора; 3—воздуховоды; 4—распределитель воздушного потока; 5—приопалубочные шторы

^{*)} Метод разработан на кафедре "Технологии строительного производства" Южно-Уральского государственного университета д.т.н., проф. Головневым С.Г. и к.т.н. Мельником А.А.

Воздуховоды изготавливаются из прорезиненной ткани. По длине они должны иметь отверстия, предусмотренные для создания струй горячего воздуха, направленных на внутренние щиты опалубки. Приопалубочные шторы выполняются из двух слоев брезента с теплоизолирующей прослойкой из ватина. Возможно также использование и других материалов.

§ 7-2. Генераторы для конвективного прогрева конструкций.

Генераторами тепла для конвективного прогрева являются электрокалориферы, так как они отличаются простотой установки, высоким КПД, низкой стоимостью, экологической безопасностью, возможностью быстрой замены в случае выхода из строя и высокой степенью безопасности обслуживающего персонала. Теплофизические параметры некоторых типов электрокалориферов, выпускаемых предприятиями Российской Федерации, представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Теплофизическая характеристика	Марка электрокалорифера					
	ЭКО-60	ЭК-52	ЭК-40	ЭТВ4-30	СФО-25	СФОО-18
Мощность ТЭН, кВт	67,5	52,5	37,5	30,0	25,0	18,0
Производительность вентилятора, м ³ /ч	4000	2600	2020	4100	1341	1000
Фирма-производитель	ОАО «Мовен» (Москва)	«Урал-Микма-Терм» (Миасс)	ООО «Сиб-пром-комплект»	«Тепло» (Омск)	ЗАО «Делсот» (Миасс)	ЗАО ПТК «Лингас» (Нижний Новгород)

Предварительно требуемую мощность теплогенератора можно определить по рис. 7.4.

Помимо электрических теплогенераторов на стройках применяются дизельные теплогенераторы прямого нагрева (табл.7.2). Благодаря прямому нагреву 100% используемого топлива преобразуется в тепло разогретого воздуха, смешанного с угарным газом. Температура выходящего газа составляет 300÷450⁰С. Благодаря этому воздух под опалубкой перекрытия разогревается до 30-50⁰С. При работе таких генераторов рабочим в тепляке работать нельзя из загрязнения воздуха продуктами сгорания топлива.

Дизельные теплогенераторы непрямого нагрева, т.е. с теплообменником, нагнетают в нагреваемое пространство чистый горячий воздух с температурой 100-120⁰С (табл.7.3). При этом, угарный газ отводится через специальный дымоход и его энергия не используется.

Таблица 7.2

Техническая характеристика дизельных теплогенераторов прямого нагрева "Термобиль"

Модель	Тепловая мощность, кВт	Расход топлива, л/ч	Производительность вентилятора, м ³ /ч	Емкость бака, л
Т/ТА-16	18,6	1,8	600	15
Т/ТА-22	25,5	2,5	600	38
Т/ТА-40	46,4	4,5	1200	80
Т/ТА-80	92,8	9,0	2350	160

Таблица 7.3

Техническая характеристика дизельных теплогенераторов непрямого нагрева "Термобиль"

Модель	Тепловая мощность, (полая) кВт	Расход топлива, л/ч	Производительность вентилятора, м ³ /ч	Емкость бака, л
ТА-25	29	2,3	1200	40
ТА-40	46	4,5	2150	80
ТА-65	75	7,5	2400	120

Теплогенераторы, аналогичные указанным в табл. 7.1 и 7.2, производят также фирмы БИ-КАР, Ижевский электромеханический завод "Купол", итальянские фирмы "Оклима", "Мизар", "Антарис", "Зеус" и др.

При выборе дизельных теплогенераторов и определения необходимого их количества можно руководствоваться ниже следующими данными, рассчитанными и практически опробованными при прогреве перекрытий толщиной 200 мм в тепляках при температуре $-5 \div -15^{\circ}\text{C}$.

При удельной тепловой мощности теплогенератора $3-5 \text{ кВт/м}^3$, удельный расход тепловой энергии при прогреве конструкции в течение около 1 суток составляет $0,06-0,10 \text{ Гкал/м}^3$. Удельный расход топлива достигает $8-12 \text{ л/м}^3$. Удельная тепловая мощность (объемная) составляет $3000-5000 \text{ Ккал/ч.м}^3$.

Таким образом, при необходимой средней тепловой мощности 800 Ккал/ч.м^3 для прогрева перекрытия площадью 100 м^2 потребуется один теплогенератор типа ТА-80 с мощностью 80 тыс.Ккал/ч.

Указанные выше показатели генерирования тепловой энергии в тепляке должны обеспечить указанные ниже параметры прогрева:

- температура разогрева бетона $30-40^{\circ}\text{C}$;
- время прогрева 24 ч;
- прочность бетона $25-30\%R_{28}$

По завершении прогрева бетон выдерживается методом термоса не менее 2 суток при температуре $25-30^{\circ}\text{C}$; прочность бетона обычно достигает $60-70\%R_{28}$.

§ 7-3. Производство работ и определение параметров прогрева.

Управление обогревом и термосным выдерживанием конструкции осуществляется на основе анализа данных контроля температуры и оценки прочности бетона.

Снятие утепления и распалубка конструкции производятся при достижении нормативных значений прочности бетона и температуры, установленных проектом.

Выбор параметров конвективного прогрева следует осуществлять в определенной последовательности.

В начале рассчитываются параметры теплогенератора. Мощность применяемого теплогенератора должна превышать количество тепла, складывающегося из теплотерь через наружные ограждения, из расхода тепла на прогрев инфильтрирующегося через ограждение воздуха, из расхода тепла на нагревание щитов опалубки и бетона:

$$Q_{\text{тепл}} \geq Q_{\text{огр}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{н.о}} + Q_{\text{н.б}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{огр}}$ – потери тепла через наружные ограждения; $Q_{\text{и}}$ – расход тепла на прогрев инфильтрирующегося через ограждение воздуха; $Q_{\text{н.о}}$ – расход тепла на нагревание щитов опалубки; $Q_{\text{н.б}}$ – расход тепла на нагревание бетона.

Потери тепла через наружные ограждения:

$$Q_{\text{огр}} = \Sigma [(t_{\text{тi}} - t_{\text{ни}}) \cdot n_i \cdot F_i \cdot \beta_i] / R_i, \quad (2)$$

где $t_{\text{тi}}$ – расчетная температура воздуха внутри тоннеля;

$t_{\text{ни}}$ – температура наружного воздуха при расчете потерь теплоты через наружные ограждения тоннеля или температура воздуха более холодного помещения при расчете потерь теплоты через внутренние ограждения прогреваемого пространства;



Рис. 7.4. Предварительный выбор теплогенератора

ные ограждения тоннеля или температура воздуха более холодного помещения при расчете потерь теплоты через внутренние ограждения прогреваемого пространства;

n_i – коэффициент, учитывающий фактическое понижение расчетной разности температур ($t_{\text{тi}} - t_{\text{ни}}$) для ограждений, которые отделяют обогреваемое помещения от не обогреваемых;

β_i – коэффициент, учитывающий дополнительные потери тепла через ограждение;

F_i – площадь ограждения;

R_i – сопротивление теплопередаче ограждения.

Потери тепла в тоннеле на нагревание наружного воздуха, поступающего в результате инфильтрации через ограждения:

$$Q_{\text{и}} = \beta_0 \cdot G \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{тi}} - t_{\text{ни}}), \quad (3)$$

где G – производительность вентилятора теплогенератора;

c_v – массовая теплоемкость воздуха;

β_0 – коэффициент, учитывающий дополнительные потери тепла в контуре при инфильтрации через ограждение.

Расход тепла на нагревание внутренних щитов опалубки:

$$Q_{н.о} = V_o \cdot c_o \cdot \rho_o \cdot u \cdot (t_{нач.о} - t_T), \quad (4)$$

где c_o – удельная теплоемкость материала внутренних щитов опалубки; V_o, ρ_o – соответственно объем и плотность материала внутренних щитов опалубки; u – средняя по объему относительная недостаточная температура.

Примечание: в случае, когда бетон укладывается в уже нагретую опалубку величину $Q_{н.о}$ в формуле (1) можно не учитывать.

Расход тепла на нагревание бетона, уложенного в опалубку:

$$Q_{н.б} = V_b \cdot c_b \cdot \rho_b \cdot (t_{нач.б} - t_b^\tau), \quad (5)$$

где c_b – удельная теплоемкость бетона; V_b, ρ_b – соответственно объем и плотность бетона; $t_{нач.б}, t_b^\tau$ – средняя температура бетона в начальный момент и через определенный период времени τ .

С учетом теплофизических характеристик выбранного теплогенератора выполняется расчет распределения температуры воздуха в приопалубочном пространстве.

«Традиционный» камерный прогрев. Температура воздуха в i -м элементарном объеме, расположенном в прогреваемом пространстве, рассчитывается по формуле:

$$t_i = 45,65 \cdot (y/L) + 0,32 \cdot (z/H) - 33,27 \cdot (y/L) \cdot (z/H) + 0,98 \cdot t_{cp} - 11,0 \cdot (y/L)^2 - 7,0 \cdot (z/H)^2 - 10,62 + 0,0006 \cdot (t_{cp})^2, \quad (6)$$

где t_{cp} – среднее значение температуры воздуха в прогреваемом пространстве: $10^\circ\text{C} \leq t_{cp} \leq 50^\circ\text{C}$; L, H – соответственно его длина и высота, м (рис. 7.5); y, z – соответствующие координаты по длине и высоте тоннеля, м; $0 \leq y \leq L, 0 \leq z \leq H$.

Среднюю температура воздуха в объеме тоннеля t_{cp} , можно найти, решив систему уравнений теплового баланса:

$$\left. \begin{aligned} Q_{огр} &= \sum [(t_{г.ср} - t_{ni}) \cdot n_i \cdot F_i \cdot \beta_i] / R_i \\ Q_{и} &= \beta_0 \cdot G \cdot c_v \cdot (t_{г.ср} - t_{ni}) \\ Q_{эл} &= Q_{огр} + Q_{и} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

«Камерный прогрев с воздуховодами». Значение температуры в i -м элементарном объеме, расположенном в замкнутом пространстве, рассчитывается по формуле:

$$t_i = 8,33 \cdot (z/H)^2 + 0,001 \cdot (t_{cp})^2 + 0,26 \cdot (z/H) \cdot t_{cp} - 7,30 \cdot (z/H) + 1,6 + 0,77 \cdot t_{cp}, \quad (8)$$

где t_{cp} – среднее значение температуры воздуха в пространстве: $10^\circ\text{C} \leq t_{cp} \leq 50^\circ\text{C}$; H – его высота в метрах; z – координата по высоте в метрах: $0 \leq z \leq H$.

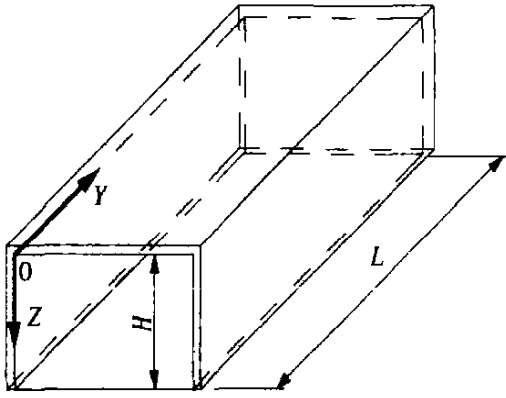


Рис.7.5. Схема для определения температуры в пространстве тоннеля

Формулы (6), (8) применимы для расчета распределения температуры воздуха в пространстве тоннеля при выполнении условия $0,5 \leq (H/L) \leq 0,62$ и их погрешность в этом случае составляет не более 13%. В случае, если условие не выполняется, то распределение температуры в приопалубочном пространстве можно определить экспериментальным путем.

«Конвективный прогрев с приопалубочными шторами». При использовании данного метода допустимо принять равномерное распределение температуры в приопалубочном пространстве.

Температуру воздуха внутри тоннеля t и температуру воздуха в приопалубочном пространстве $(t+\Delta t)$ можно найти, решив систему уравнений теплового баланса:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{опал}} &= \Sigma [((t+\Delta t) - t_{\text{нi}}) \cdot n_i \cdot F_i \cdot \beta_i] / R_i \\ Q_{\text{и}} &= \beta_0 \cdot G \cdot c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{нi}} - t_{\text{нi}}) \\ Q_{\text{пол}} &= [(t - t_{\text{н.п}}) \cdot n_i \cdot F_{\text{пол}} \cdot \beta_i] / R_{\text{пол}} \\ Q_{\text{шт}} &= [(t - t_{\text{нi}}) \cdot n_i \cdot F_{\text{шт}} \cdot \beta_i] / R_{\text{шт}} \\ Q_{\text{приоп.шт}} &= \Sigma \Delta t \cdot F_{\text{приоп.шт}} / R_{\text{приоп.шт}} \\ Q_{\text{эл}} &= Q_{\text{опал}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{пол}} + Q_{\text{шт}} + Q_{\text{приоп.шт}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $Q_{\text{и}}$, $Q_{\text{пол}}$, $Q_{\text{шт}}$ – потери тепла воздушной средой в тоннеле соответственно на инфильтрацию, через пол и через штору, закрывающую вход в тоннель, Вт;

$Q_{\text{опал}}$, $Q_{\text{приоп.шт}}$ – потери тепла приопалубочного пространства через конструкцию стен, перекрытий и через приопалубочные шторы, соответственно, Вт; $F_{\text{приоп.шт}}$ – площадь приопалубочных штор, м²; $R_{\text{приоп.шт}}$ – сопротивление теплопередаче приопалубочных штор, (м²·°C)/Вт. Для приближенного расчета значение Δt можно принять в интервале от 12 до 18°С.

Задача определения температуры в бетоне может быть решена на основании численного метода тепловых балансов. Прогреваемая конструкция разбивается на элементарные объемы – симплексы; внутри каждого из них намечается узловая точка. Затем составляется уравнение энергетического баланса для каждого элементарного объема: количество тепла, воспринятое (или отданное) от соседних элементов, обуславливает теплосодержание рассматриваемого. При трехмерном температурном поле температура произвольного элемента, $t_{i,j,k}$ через период времени Δt составит:

$$\begin{aligned} t_{i,j,k}^{\tau+\Delta\tau} &= t_{i,j,k}^{\tau} + \Delta\tau (\Delta V_{i,j,k} \cdot \rho_{i,j,k} \cdot c_{i,j,k}) \times [[(t_{i-1,j,k} - t_{i,j,k}) \cdot \Delta y \cdot \Delta z] / R_{i-1,j,k} + \\ &+ [(-t_{i,j,k} + t_{i+1,j,k}) \cdot \Delta y \cdot \Delta z] / R_{i+1,j,k} + [(t_{i,j,k-1} - t_{i,j,k}) \cdot \Delta x \cdot \Delta z] / R_{i,j,k-1} + \\ &+ [(-t_{i,j,k} + t_{i,j,k+1}) \cdot \Delta x \cdot \Delta z] / R_{i,j,k+1} + [(t_{i,j,k-1} - t_{i,j,k}) \cdot \Delta x \cdot \Delta y] / R_{i,j,k-1} + \\ &+ [(-t_{i,j,k} + t_{i,j,k+1}) \cdot \Delta x \cdot \Delta y] / R_{i,j,k+1}], \end{aligned} \quad (10)$$

где $t_{i-1,j,k}, \dots, t_{i,j,k+1}$ – температура в соответствующих точках; $R_{i-1,j,k}, \dots, R_{i,j,k+1}$ – термическое сопротивление между соответствующими узлами в направлениях x, y, z ; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – шаг узловых точек в направлении соответствующего

щих осей; $\Delta V_{i,j,k}$ – объем рассматриваемого элемента; $t_{i,j,k}^{\tau}$, $t_{i,j,k}^{\tau+\Delta\tau}$ – температура в узловой точке в моменты времени τ , $\tau+\Delta\tau$; $\rho_{i,j,k}$, $c_{i,j,k}$ – плотность и удельная теплоемкость элемента.

Уравнение (10) позволяет рассчитать температуру в узловой точке конструкции в момент времени $\tau+\Delta\tau$, если известно первоначальное распределение температур, а также заданы граничные условия.

На основании полученного распределения температуры производится расчет распределения прочности в бетоне прогреваемой конструкции через заданный период времени.

Производится сравнение рассчитанного значения прочности с требуемым. Если требуемое значение прочности не превышает рассчитанное, то расчет завершен, в противном случае расчет повторяется, при этом производится увеличение мощности теплогенератора и/или используется более эффективное утепление наружных опалубочных щитов и бетона перекрытия.

§ 7-4. Пример расчета технологических параметров конвективного прогрева

1. Требуется рассчитать параметры конвективного прогрева монолитных стен и перекрытий крайнего тоннеля (в осях 1-2, ряды В-Г) строящегося 9-ти этажного жилого дома (рис. 7.6). Высота этажа здания – 3,0 м. Монолитные стены и перекрытия возводятся из бетона класса В25 в объемно-переставной (тоннельной) опалубке, извлекаемой на фасад. Толщина возводимых конструкций стен и перекрытий – 160 мм. Район строительства – г. Челябинск. Температура наружного воздуха минус 16°C, скорость ветра 5 м/с.

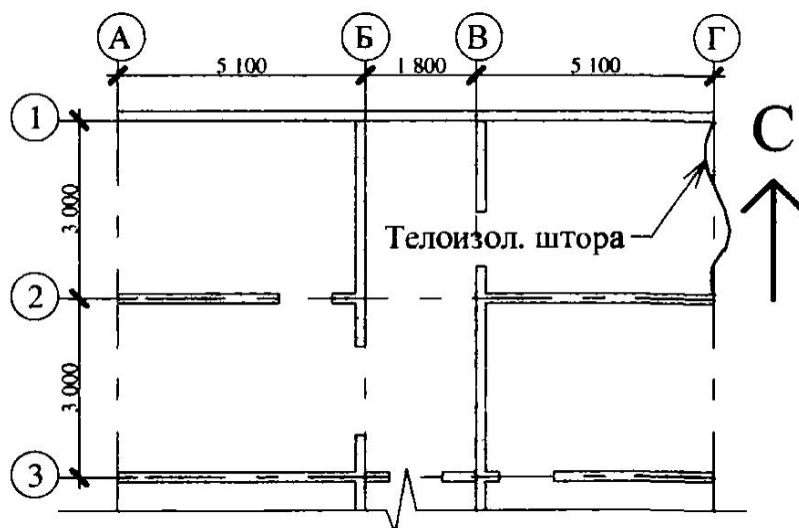


Рис.7.6. Схема расположения монолитных конструкций

2. Теплофизические характеристики: а) наружных опалубочных щитов: материал – стальной лист, утепленный пенополистиролом, толщина утеплителя $\delta_{\text{ут}}=50$ мм, коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ут}} = 0,06$ Вт/(м·°С); б) внутренних опалубочных щитов: материал – стальной лист, толщина $\delta_0 = 4$ мм, коэффициент теплопроводности $\lambda_0=58$ Вт/(м·°С); в) возводимых конструкций: материал – железобетон, толщина

$\delta_6 = 160$ мм, плотность $\gamma_6 = 2500$ кг/м³, удельная теплоемкость $c_6 = 840$ Вт·с/(кг·°С), коэффициент теплопроводности $\lambda_6 = 1,86$ Вт/(м·°С); г) теплоизолирующей шторы, перекрывающей вход в тоннель во время конвективного прогрева: материал – брезент, утепленный ватином, толщина $\delta_{шт} = 14$ мм, коэффициент теплопроводности $\lambda_{шт} = 0,12$ Вт/(м·°С).

3. Для осуществления термообработки бетона был выбран метод «конвективного прогрева с приопалубочными шторами».

4. Расчет мощности теплогенератора.

4.1 Определяем потери тепла через ограждения (табл.7.4), по формуле (1). Среднюю температуру воздуха в объеме тоннеля первоначально принимаем 30°С.

Таблица 7.4

Потери тепла через ограждения тоннеля

№ п/п	Вид ограждения	Площадь $F, \text{ м}^2$	Сопrotивление теплопередаче $R, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$	Разность внутренней и наружной температуры $(t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}), \text{ °C}$	Кoэффициент β	Кoэффициент η	Потери тепла $Q_{\text{отр}}, \text{ Вт}$
1	Стена В-Г, ось 1	15,3	1,04	46	1,2	1	812
2	Стена 1-2, ряд В	9,0	0,31	0	-	-	0
3	Стена В-Г, ось 2	15,3	0,31	0	-	-	0
4	Штора 1-2, ряд В	9,0	0,24	46	1,2	1	2070
5	Перекрытие 1-2, В-Г	15,3	1,04	46	1	1	677
6	Пол тоннеля 1-2, В-Г	15,3	0,20	46	1	1	3519
	Итого:						7078

4.1.1 Сoпротивление теплопередаче конструкций в таблице 4, рассчитывается по формуле:

$$R = 1/\alpha_{\text{н}} + \delta_i/\lambda_i + 1/\alpha_{\text{в}}, \quad (15)$$

где $\alpha_{\text{н}}$, $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициенты теплоотдачи соответственно наружной и внутренней поверхности ограждающей конструкции. При расчете $\alpha_{\text{н}}$: $\alpha_{\text{к}} = 14,6$ Вт/(м²·°С), ($\gamma_{\text{в}} = 1,374$ кг/м³ при $t_{\text{н}} = -16$ °С; $V = 5$ м/с, согласно заданным климатическим условиям; $L = 5,1$ м, длина рассчитываемых конструкций стены и перекрытия); $\alpha_{\text{п}} = 2,9$ Вт/(м²·°С), ($\epsilon = 0,75$ для наружных щитов опалубки, $B = 0,68$ при $t_{\text{н}} = -16$ °С). Таким образом, $\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{п}} = 17,5$ Вт/(м²·°С). При расчете $\alpha_{\text{в}}$: $\alpha_{\text{к}} = 10,7$ Вт/(м²·°С), ($\gamma_{\text{в}} = 1,165$ при $t_{\text{в}} = 30$ °С; скорость воздушного потока V , обтекающего опалубку принимается от 2 до 5 м/с, в рассматриваемом примере $V = 4,0$ м/с; $L = 5,1$ м); $\alpha_{\text{п}} = 5,5$ Вт/(м²·°С), ($\epsilon = 0,92$, для внутренних стальных щитов опалубки, $B = 1,05$ при $t_{\text{в}} = 30$ °С). Таким образом, $\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{п}} = 16,2$ Вт/(м²·°С).

4.1.2 Потери тепла в тоннеле на нагревание наружного воздуха, поступающего в результате инфильтрации через ограждения $Q_{\text{н}}$ определяются по формуле (3). Производительность теплогенератора принимаем $G = 1562$ кг/ч (при $t_{\text{в}} = 30$ °С,

электрокалорифер СФО–25). После подстановки теплоемкости поступающего наружного воздуха $c_v = 0,280 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ при $t_n = -16^\circ\text{C}$, разности внутренней и наружной температуры $(t_{Ti} - t_{ni}) = 46^\circ\text{C}$, коэффициента $\beta_0 = 0,6$ в формулу (3) находится значение $Q_n = 12422 \text{ Вт}$.

4.1.3 Расход тепла на нагревание бетона, уложенного в опалубку $Q_{н.б}$, определяют по формуле (4). Удельная теплоемкость бетона $c_б = 840 \text{ Вт}\cdot\text{с}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C}) = 0,84 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; объем бетона $V_б = 8,8 \text{ м}^3$, плотность бетона $\gamma_б = 2500 \text{ кг}/\text{м}^3$; $t_{нач.б} = 15^\circ\text{C}$, через период подъема температуры, принимаемый $\tau = 24$ часа, температура в бетоне должна увеличиться до $t_б^\tau = 30^\circ\text{C}$. Таким образом количество тепла на нагревание бетона за 24 часов составит: $Q_{н.б}^\tau = 277200 \text{ кДж}$. Требуемый расход тепла на нагревание бетона:

$$Q_{н.б} = 277200 \cdot 10^3 \text{ Дж} / (24 \cdot 3600 \text{ с}) = 3208 \text{ Вт}.$$

4.1.4 При возведении монолитных конструкций укладку бетона осуществляют в нагретую до бетонирования опалубку, в связи с чем расход тепла на нагревание щитов опалубки в расчете не учитывается: $Q_{н.о} = 0$.

4.1.5 Требуемая мощность теплогенератора определяется по формуле (1):
 $Q_{тепл} \geq 7078 \text{ Вт} + 12422 \text{ Вт} + 0 + 3208 \text{ Вт} = 22708 \text{ Вт}$.

4.1.6 С учетом требуемой мощности для осуществления конвективного прогрева был выбран электрокалорифер СФО – 25, мощностью 25000 Вт (табл. 7.1).

4.2 Расчет температуры в приопалубочном пространстве. Температура в приопалубочном пространстве $(t + \Delta t)$ для конвективного прогрева с приопалубочными шторами определяется из решения системы уравнений (9). Величина Δt принимается равной 15°C . Выполняется расчет потерь тепла через ограждения, аналогичный расчету, приведенному в таблице 2: $Q_{опал. стень} = 17,7 \cdot t_\tau + 547$; $Q_{опал. перекр.} = 14,7 \cdot t_\tau + 456$; $Q_{шторы} = 45,0 \cdot t_\tau + 720$; $Q_{пол} = 76,5 \cdot t_\tau + 1224$. Потери тепла через приопалубочные шторы: $Q_{приоп.шт} = \Delta t \cdot F_{приоп.шт} / R_{приоп.шт} = 15 \cdot 54,9 / 0,24 = 3431$.

Потери тепла на инфильтрацию: $Q_n = 270,0 \cdot t_\tau + 4320$. Из равенства расхода и поступления тепла в рассматриваемом тоннеле:

$Q_{тепл.} = Q_{опал. стень} + Q_{опал. перекр.} + Q_n + Q_{пол} + Q_{шт} + Q_{приоп.шт} = 423,9 \cdot t_\tau + 10698$. После подстановки мощности выбранного теплогенератора СФО – 25 вычисляется температура в тоннеле: $t_\tau = 34^\circ\text{C}$. Температура в приопалубочном пространстве: $(t + \Delta t) = 49^\circ\text{C}$.

4.3 Определение температуры в бетоне. Согласно требованиям строительных норм: прочность бетона монолитных конструкций перекрытий к моменту распалубки при пролете до 6 м должна составлять не менее 70% проектной прочности; прочность бетона монолитных конструкций стен – не менее 40% проектной прочности. Поэтому конструкцией, определяющей продолжительность термообработки, является перекрытие.

§ 7-5. Техника безопасности при конвективном прогреве.

Все работы по конвективному прогреву выполняются в соответствии с требованиями СНиП 12-03-2001, СНиП 12-04-2002 "Безопасность труда в строительстве".

Размещение теплогенераторов и оборудования для конвективного прогрева должно быть выполнено в соответствии с проектом производства работ и технологическими картами. Перемещение, подъем и установка теплогенераторов и другого электрооборудования допускается только в обесточенном состоянии. После установки электрооборудования следует визуально проверить состояние изоляции проводов, целостности корпусов и заземления. Обнаруженные неисправности необходимо устранить. Монтаж и присоединение электрооборудования к питающей сети должны выполнять электромонтеры, имеющие квалификационную группу по технике безопасности не ниже III.

Эксплуатация теплогенераторов должна осуществляться в соответствии с требованиями Правил устройства электроустановок (ПУЭ), Правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей (ПТБ), Инструкции по эксплуатации завода-изготовителя.

Приопалубочные шторы и воздухопроводы должны изготавливаться из огнестойких метариллов. Закрепление приопалубочных и теплоизолирующих штор (перекрывающих вход в тоннель) к верхним точкам опалубочных щитов допускается производить только с инвентарных подмостей. После монтажа оборудования, до укладки бетона в опалубку необходимо осуществлять его пробный запуск с целью убедиться в работоспособности системы.

Зона конвективного прогрева должна находиться под круглосуточным наблюдением электромонтеров, иметь защитное ограждение, удовлетворяющее ГОСТ 23407, световую сигнализацию и знаки безопасности. Сигнальные лампы подключаются так, чтобы при их перегорании отключалась подача напряжения. Отключение теплогенераторов производится после достижения бетоном заданной прочности, с разрешения производителя работ, а для особо ответственных конструкций (по перечню, установленному проектом) – технического руководителя.

Контроль температуры бетона рекомендуется осуществлять дистанционными методами с соблюдением требований безопасности труда. Размещение в зоне конвективного прогрева оборудования и материалов, не предусмотренных проектом производства работ, а также пребывание людей, непосредственно не участвующих в процессе термообработки, не допускается.

Производственные территории должны быть оборудованы средствами пожаротушения согласно Правилам пожарной безопасности в Российской Федерации.

Глава 8. ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ (ИНДУКЦИОННЫЙ ПРОГРЕВ)

§ 8-1. Сущность метода и область применения

Индукционный метод термообработки бетона основан на использовании магнитной составляющей переменного электромагнитного поля для нагрева стали вследствие теплового действия электрического тока, наводимого электромагнитной индукцией (вихревые токи).

При индукционном нагреве энергия переменного электромагнитного поля преобразуется в арматуре или стальной опалубке в тепловую и передается теплопроводностью бетону (рис.8.1).

Индукционный метод может быть применен как для термообработки бетона некоторых типов монолитных конструкций в условиях строительной площадки, так и для ускорения твердения бетона конструкций при изготовлении их в условиях припостроечных полигонов.

Индукционный нагрев насыщенных арматурой каркасных конструкций, возводимых в стальной (ферромагнитной) опалубке, обладает рядом достоинств:

- органически просто осуществляется прогрев бетона насыщенных металлом конструкций за счет теплопроводности;
- обеспечивается равномерное по сечению и длине конструкций температурное поле;
- легко и быстро без дополнительных источников тепла осуществляется предварительный перед укладкой бетона отогрев арматуры, жесткого каркаса, металлической опалубки, а также при необходимости отогрев ранее уложенного и замороженного бетона;
- обеспечивается возможность круглогодичного использования металлической опалубки;
- исключается расход стали на электроды и коммутационных проводов по сравнению с электродным электропрогревом.

§ 8-2. Технологи́я производства работ при прогреве бетона в электромагнитном поле

Индукционный нагрев позволяет вести термообработку бетона монолитных железобетонных каркасных конструкций (рис.8.1) колонны, ригели, балки, прогоны, элементы рамных конструкций, отдельные опоры замоноличивания стыков каркасных конструкций; сталебетонных и сборно-монолитных конструкций; омоноличивания каркаса и усиления каркасных конструкций; монолитных железобетонных сооружений, возводимых в скользящих, подъемно-переставных и катучих опалубках (стволы труб, силовых, ядер жесткости, коллекторы и т.п.); железобетонных изделий в условиях припостроечных полигонов (ригели, балки, колонны, перемычки, сваи, опоры, трубы, колодцы, элементы элеваторов и т.п.).

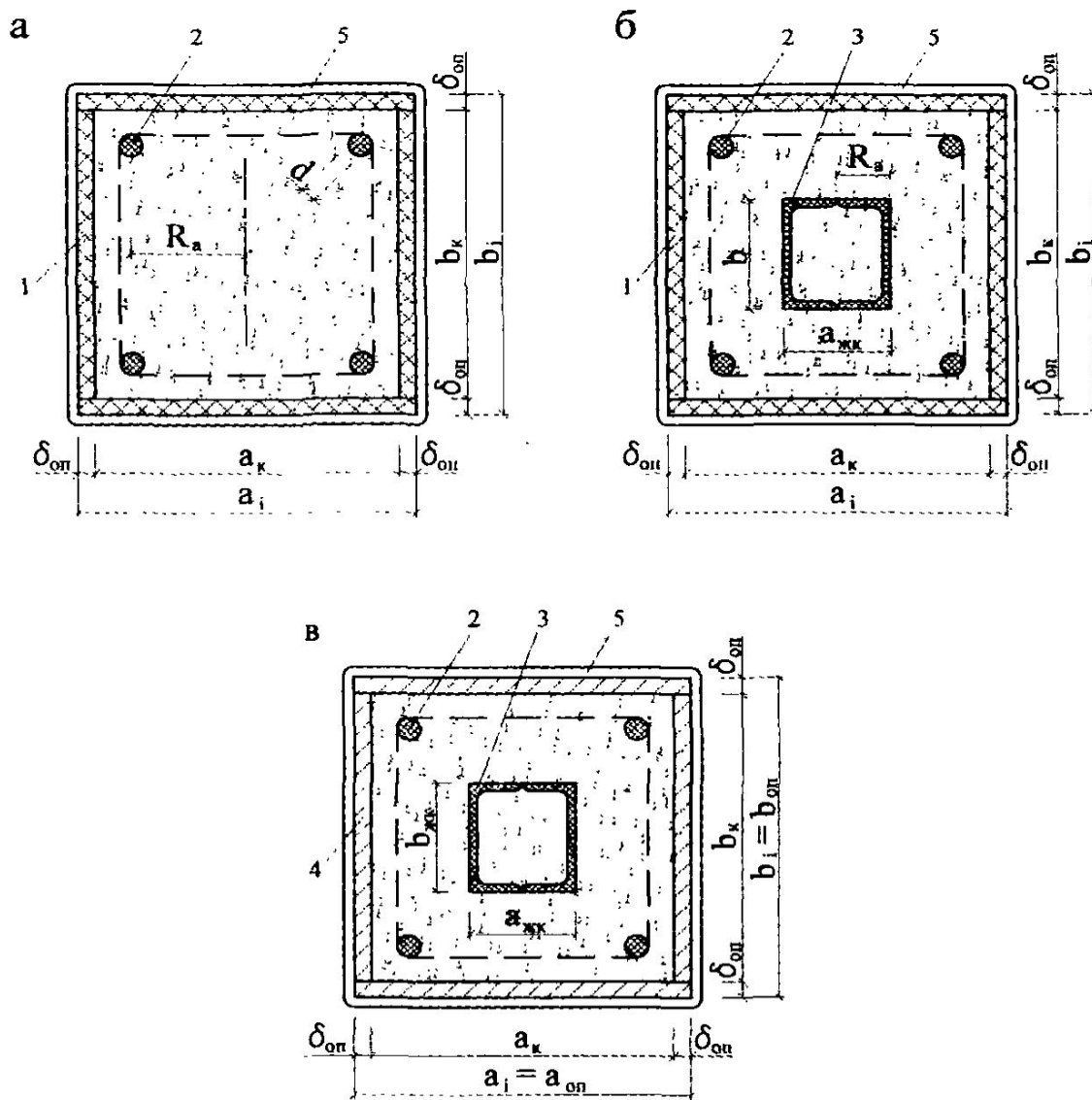


Рис. 8.1. Схема расположения источников тепла при индукционном нагреве.

а - стержневая арматура в деревянной опалубке; б - стержневая арматура и жесткий каркас в деревянной опалубке; в - стержневая арматура и жесткий каркас в металлической опалубке.

1 - деревянная опалубка; 2 - стержневая арматура; 3 - жесткий каркас; 4 - металлическая опалубка; 5 - индуктор.

Конструктивное устройство индукторов и их расчет. В зависимости от вида и конструктивных особенностей железобетонных конструкций термообработка их индукционным способом может быть осуществлена по одной из двух принципиальных схем: по схеме индуктивной катушки с железом и по схеме трансформатора с сердечником.

Схема индуктивной катушки с железом имеет место в том случае, когда элемент железобетонной конструкции в процессе термообработки находится в полости индукционной обмотки (рис.8.2), выполненной в виде цилиндрического, прямоугольного, трапециевидного и тому подобного соленоида (рис.8.3). При термообработке по этой схеме тепло в основном выделяется в ферромагнитных элементах (арматура, жесткий каркас, стальная опалубка, форма), направление которых совпадает с направлением оси соленоида. Незначительная часть тепла выделяется в металлических замкнутых элементах (хомуты арматуры, опалубка), плоскость которых перпендикулярна оси соленоида.

Схема трансформатора с сердечником имеет место в том случае, когда в полости железобетонного изделия или сооружения расположен магнитопровод (или группа магнитопроводов) с индукционной обмоткой. Здесь тепло в основном выделяется в электрически замкнутых металлических элементах (замкнутая металлическая форма, опалубка, арматурные хомуты или замкнутая поперечная арматура, кольцевая арматура и т. д.), плоскость которых перпендикулярна оси магнитопровода.

Вихревые токи, возникающие в металле (арматурных стержнях, элементах стальной опалубки и т.п.), циркулируют не по всей его толщине. Электромагнитная волна по мере проникновения вглубь металла затухает, вследствие чего плотность тока и напряженность электрического и магнитного полей при переменном токе имеет наибольшее значение у поверхности металла.

Поверхностный слой, где амплитуда падающей электромагнитной волны снижается в e раз (где e – основание натурального логарифма) и джоулево тепло, выделенное индуцированными токами, составляет 90% от всего тепла и численно равно теплу, которое выделил бы ток, циркулирующий только в этом слое и имеющий в нем постоянную плотность, называется глубиной проникновения тока в металл Δ_s .

Глубина проникновения Δ_s , м, тока частотой f , Гц, в металл, имеющий удельное электросопротивление ρ_s , Ом·м, и магнитную проницаемость μ определяется по формуле

$$\Delta_s = 5030 \sqrt{\frac{\rho_s}{\mu f}} \quad (1)$$

Активная мощность ΔP , кВт/м², выделяющаяся с единицы поверхности металла, обладающего поверхностным сопротивлением ρ_n , Ом, и находящегося в переменном магнитном поле напряженностью H , А/м, выражается формулой

$$\Delta P = \rho_n H^2, \quad (2)$$

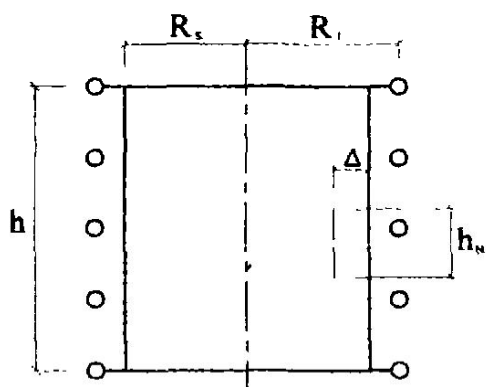


Рис. 8.2. Схема индуктора и загрузки.

R_i - радиус индуктора;
 R_s - радиус загрузки;
 h - высота индуктора и загрузки;
 N - количество витков индуктора;
 Δ - глубина проникновения тока в металл;

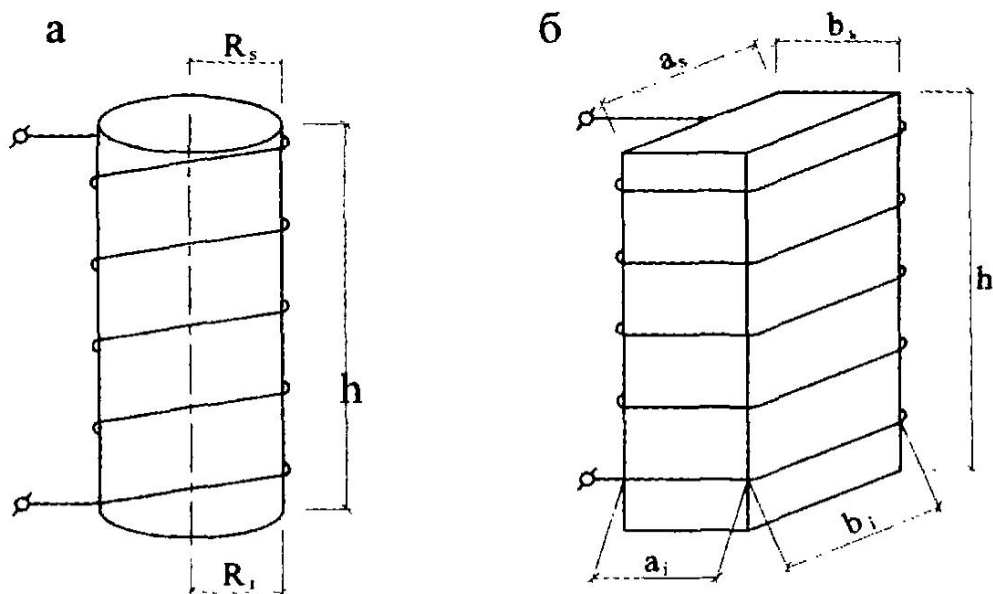


Рис. 8.3. Расчетная схема системы индуктор-загрузка.

а - цилиндрическая система;
 б - прямоугольная система;
 R_i - радиус индуктора; R_s - радиус загрузки;
 a_s и b_s - размеры загрузки; a_i и b_i - размеры индуктора;
 h - высота индуктора и загрузки.

$$\rho_n = \frac{\rho_s}{\Delta_s} \quad (3)$$

Зависимость ΔP и ρ_n от напряженности магнитного поля H для сталей с различным удельным электросопротивлением представлена на рис. 8.4.

Расчет потребной удельной активной мощности ΔP и соответственно остальных параметров индукционных систем производится исходя из величины общей активной мощности P_{as} , кВт, необходимой для обеспечения заданного режима термообработки и определяется по формуле

$$P_{as} = P_n V, \quad (4)$$

где P_n – требуемая удельная тепловая мощность, кВт/м³, определяется по формуле $P_n = P_1 + P_2 + P_3$

где P_1 и P_2 – мощность электрическая, необходимая для разогрева бетона и для нагрева опалубки, кВт/м³;

P_3 – мощность электрическая, расходуемая на восполнение теплотерь в окружающую среду, кВт/м³.

Определяются они по аналогии с $P_1 = \frac{C_1 \gamma_1 (t_1 - t_2)}{864 \tau_1}$, но с учетом удельной теплоемкости объемной массы и толщины материала опалубки, и с учетом M_n конструкции и коэффициента теплопередачи опалубки (Вт/м²·°С) при определении P_3 .

Здесь C_1 – удельная теплоемкость бетона, ккал/кг·°С;

γ_1 – объемный вес массы бетона, кг/м³;

t_1 – температура изотермического прогрева, °С;

t_2 – начальная температура бетона, °С;

τ_1 – продолжительность подъема температуры до температуры изотермического прогрева, час.

Удельная активная мощность, необходимая для термообработки конструкции с активной поверхностью металла S_a , м², определяется по формуле

$$\Delta P = \frac{P_{as}}{S_a} \quad (5)$$

Расчет параметров индукционного нагрева по схеме индуктивной катушки с железом

Расчет параметров индукционной системы заключается в определении:

- числа витков N индукционной обмотки (индуктора) при выбранном напряжении U ;
- силы тока в индукторе J , А;
- коэффициента мощности $\cos \varphi$;
- полной мощности системы P_c , кВА;
- мощности конденсаторной батареи P_k , кВАр;
- емкости конденсаторной батареи C_k , мкФ, для компенсации реактивной мощности.

Число витков индуктора N определяется по формуле

$$N = \frac{U}{Z_0 H}, \quad (6)$$

где U – выбранное напряжение, В;

H – напряженность магнитного поля индуктора, определяемая по рис. 8.4 в зависимости от удельной мощности ΔP , А/м;

Z_0 – приведенное полное сопротивление системы, Ом, определяемое по формуле:

$$Z_0 = \sqrt{r_o^2 + (\omega L_o)^2}, \quad (7)$$

где $r_o = 1,1 \rho_H \sum \Pi_s F_s;$ (8)

$$\omega L_o = 4,10^{-4} S_i m + \rho_H \sum \Pi_s Q_s \quad (9)$$

$\sum \Pi_s$ – сумма периметров сечения металла (арматуры, каркаса, опалубки), м;

F_s и Q_s – безразмерные коэффициенты сопротивления, определяемые для листовой стали толщиной Δ , м, в зависимости от отношения $\frac{2\Delta}{\Delta_s}$ по рис. 8.5,

для стержневой арматуры радиусом r , м, в зависимости от отношения $\frac{r\sqrt{2}}{\Delta_s}$ по рис. 8.6;

m – безразмерный коэффициент формы индуктора, зависящий от отношения длины (высоты) индуктора к его радиусу и определяемый по графику рис. 8.7;

S_i – площадь сечения индуктора, м².

Сила тока I индуктора длиной (высотой) h определяется по формуле

$$I = \frac{Hh}{N} \quad (10)$$

По величине тока, полученной по формуле (10), подбирается сечение провода (кабеля, шины) индуктора. Если по каким-либо причинам полученная величина силы тока не может быть принята для прогрева, производят перерасчет. Для этого, задаваясь допустимой для данных условий величиной силы тока и сохраняя неизменной величину H , находят по формуле (6) необходимое напряжение.

Расчет параметров для изотермического прогрева сводится к определению напряжения исходя из формулы (6), которое при сохранении полученного расчетом числа витков индуктора, обеспечивало бы соблюдение заданного режима изотермического прогрева.

Коэффициент мощности системы $\cos \varphi$ определяется по формуле

$$\cos \varphi = \frac{r_o}{Z_0} \quad (11)$$

Полная мощность системы P_c определяется по формуле

$$P_c = \frac{P_{as}}{\cos \varphi} \quad (12)$$

Пример расчета индукционной системы по схеме индуктивной катушки с железом приведен ниже (пример 1).

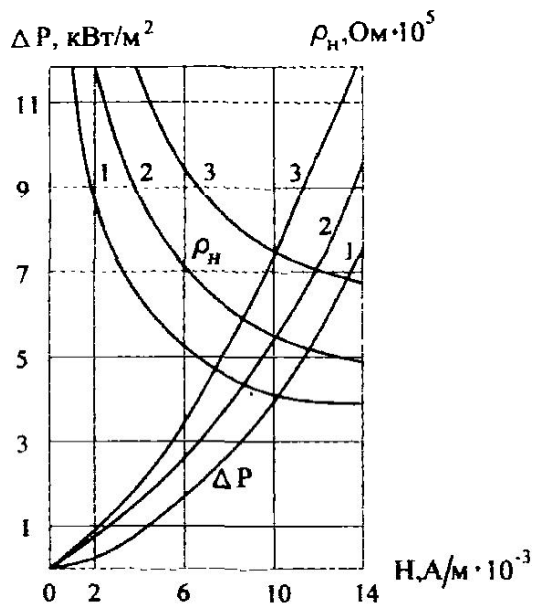


Рис.8.4 Зависимость удельного поверхностного электросопротивления ρ_n и удельной активной мощности ΔP от напряженности магнитного поля H

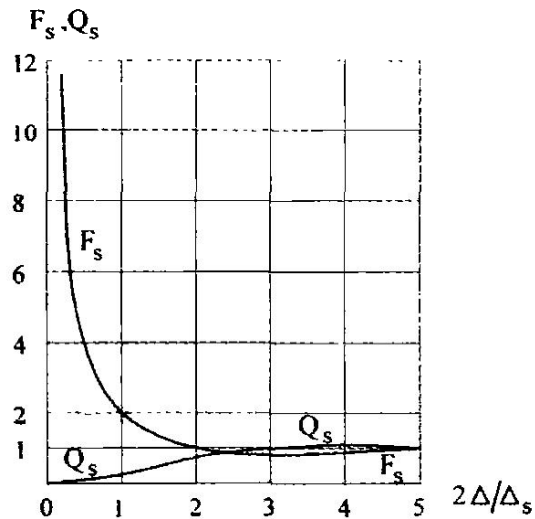


Рис. 8.5. Зависимость безразмерных коэффициентов сопротивления F_s и Q_s для $2\Delta/\Delta_s$ металлической плиты (листа) от относительной толщины плиты (листа)

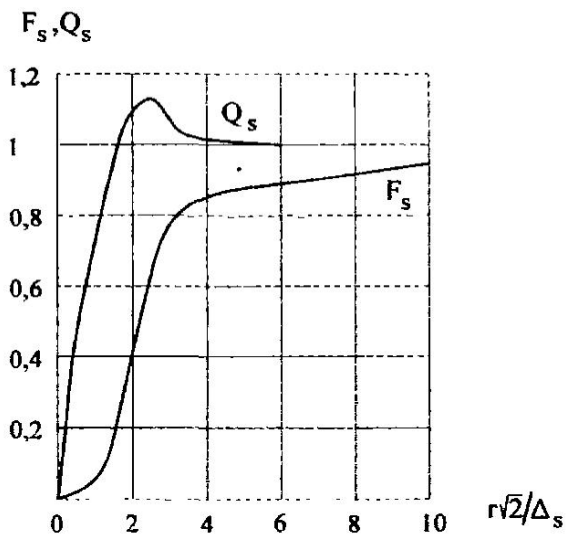


Рис. 8.6. Зависимость безразмерных коэффициентов сопротивления для металлического стержня от аргумента $r\sqrt{2}/\Delta_s$

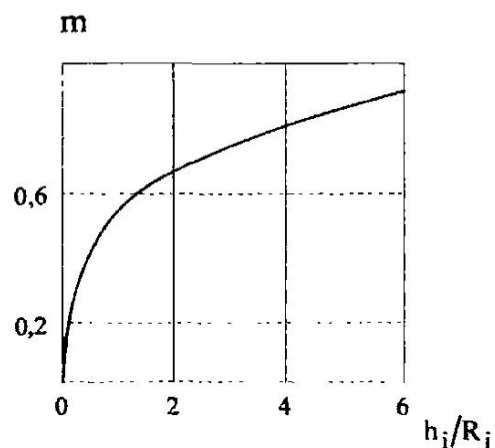


Рис. 8.7. Коэффициент формы индуктора m в зависимости от отношения высоты индуктора h_i к его радиусу R_i

Расчет параметров индукционного нагрева по схеме трансформатора с сердечником

Исходя из заданного режима термообработки и конкретных размеров конструкции расчетом определяются количество витков намагничивающей обмотки N , сила тока I , коэффициент мощности $\cos \varphi$ и полная мощность P_c .

Число витков намагничивающей обмотки N при полной мощности системы P_c , выбранном напряжении U и напряженности магнитного поля H , определенной исходя из удельной активной мощности ΔP или по графику рис. находится по формуле

$$N = 1,4 \cdot 10^{-3} \frac{HhU}{P_c}, \quad (13)$$

где

$$P_c = \sqrt{1,2P_{as}^2 + (1,1P_{as} + 1,6 \cdot 10^{-8} hfF_s H^2)^2}, \quad (14)$$

F_s - площадь зазора между намагничивающей обмоткой на магнитопроводе и нагреваемым изделием.

Сила тока в намагничивающей обмотке при выбранном напряжении U определяется по формуле

$$I = \frac{P_c}{U} 10^3 \quad (15)$$

Коэффициент мощности системы $\cos \varphi$ определяется по формуле

$$\cos \varphi = 1,1 \frac{P_{as}}{P_c} \quad (16)$$

Пример расчета параметров индукционной системы по схеме трансформатора с сердечником приведен ниже (пример 2).

Компенсация реактивной мощности

Компенсация реактивной мощности производится путем подключения к цепи батарей конденсаторов (например, бумажно-масляных конденсаторов типа КМ).

Расчет требуемой мощности батарей конденсаторов ведется в следующем порядке:

1. Определяется величина $\cos \varphi$ системы и вычисляется $\operatorname{tg} \varphi$;
2. Устанавливается требуемая величина коэффициента мощности $\cos \varphi$, до которой нужно компенсировать реактивную мощность, и вычисляется $\operatorname{tg} \varphi$;
3. По известной активной мощности P_{as} определяется необходимая мощность батареи конденсаторов, измеряемая в кВАр:

$$P_k = 1,1P_{as} (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_i) \quad (17)$$

4. Емкость конденсаторной батареи C_k , мкФ, необходимая для полной компенсации реактивной мощности, определяется по формуле

$$C_k = \frac{\sqrt{P_c^2 - 1,2R_{as}^2}}{2\pi f U_k^2} 10^9, \quad (18)$$

где U_k – напряжение на конденсаторе.

§ 8-3. Порядок выполнения работ по индукционному нагреву монолитных конструкций.

При индукционном нагреве бетона принимается следующий порядок производства работ:

- установка и утепление опалубки;
- устройство индуктора;
- предварительный отогрев металла (арматуры, каркаса, опалубки) и ранее уложенного бетона (при необходимости);
- укладка бетона;
- прогрев бетона по принятому режиму;
- регулируемое (при необходимости) остывание.

До начала бетонирования по наружной поверхности опалубки с двух противоположных сторон конструкции выставляются шаблоны с пазами для размещения витков индуктора. Количество пазов должно соответствовать расчетному числу витков индуктора. В центральной части конструкции, равной $3/5$ ее длины (высоты), пазы располагаются равномерно с шагом h/N , а к торцам конструкции, шаг сокращается до $0,5 h/N$.

В пазы шаблонов последовательными витками укладывается изолированный провод (типа ПРГ, АПРГ и т.п.), соответствующий расчетной токовой нагрузке, и созданный таким образом индуктор подключается к питающей сети.

У торцов конструкции, соприкасающихся с ранее уложенным бетоном или с холодным воздухом, происходит интенсивный отток тепла из примыкающих к ним зон. Для компенсации теплотерь в торцах расчетную высоту (длину) индуктора следует увеличивать на 10-20 см в обе стороны.

При больших объемах бетона и значительной длине провода индукционной обмотки целесообразно составлять индуктор из отдельных секций. Длина секции при этом подбирается таким образом, чтобы ее вес не превышал 15-20 кгс. Оба конца секции должны иметь стандартные наконечники под болтовое соединение.

При необходимости термообработки большого количества конструкций одного типоразмера целесообразно изготовление и использование инвентарных разъемных индукторов.

При прохождении по индуктору одного и того же тока количество выделяемого тепла будет больше в конструкции с металлической опалубкой, так как площадь источников тепла будет больше на величину, равную удвоенной поверхности металлической опалубки. Следовательно, для разогрева по заданному режиму бетона в металлической опалубке понадобится меньшая, чем для конструкции в деревянной опалубке, сила тока и, естественно, меньшая установленная мощность.

Кроме того, при применении металлической опалубки в сечении конструкции формируется более равномерное температурное поле, что позволяет разогревать те же конструкции с более высокой скоростью (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Вид армирования	Скорость разогрева бетона при модуле поверхности конструкции, °С/ч		
	5-6	7-9	10-12
Стержневая арматура	3/5	5/8	8/10
Жесткий каркас	5/8	8/10	10/15
Стержневая арматура и жесткий каркас	8/8	10/10	15/15

Примечание. Над чертой приведены скорости для конструкций, возводимых в неметаллической; под чертой - в металлической опалубке.

При возведении конструкций в стальной опалубке во избежание теплопотерь целесообразно устраивать простейшую теплоизоляционную рубашку из мешковины, парусины и т. п.

После установки индуктора производят, если это необходимо, предварительный отогрев арматуры, жесткого каркаса, закладных деталей или участков стыкуемых элементов.

Предварительный отогрев осуществляется включением индуктора по режиму разогрева на время, достаточное для отогрева металла.

Предварительный, перед укладкой бетонной смеси, отогрев металла и арматуры при применении индукционного метода безусловно обязателен только при наличии на металле наледи. В остальных случаях отогрев арматуры можно начинать вместе с началом бетонирования и во время перерывов в бетонировании.

Для повышения конечной прочности бетона рекомендуется выдерживать его до начала прогрева в течение нескольких часов при низких положительных температурах (не ниже 5°С), что достигается периодическим включением индуктора на 5-10 мин в каждый час предварительной выдержки.

При термообработке сборно-монолитных конструкций следует принять меры, к сохранению тепла аккумуляированного сборными элементами в процессе их предварительного разогрева и использованию этого тепла для прогрева бетона монолитной части.

Скорость подъема температуры бетона в период разогрева устанавливается в зависимости от модуля поверхности прогреваемой конструкции, характера армирования конструкции и материала опалубки по табл. 8.1.

При термообработке длинномерных конструкций в условиях припостроечных полигонов с целью обеспечения сцепления арматуры с бетоном в зоне анкеровки укладку бетона следует производить только на предварительно отогретую арматуру. При укладке горячих бетонных смесей предварительный отогрев арматуры не требуется.

Поддержание температуры изотермического прогрева достигается либо переключением индуктора на более низкое напряжение, полученное по расчету, либо обеспечением импульсного режима путем периодического включения и отключения напряжения.

Силу тока в индукторе, а, следовательно, и мощность тепловыделения на период изотермического выдерживания можно понизить переключением схемы соединения групп прогреваемых конструкций с параллельной на последовательную, с треугольника на звезду.

Эффективным методом термообработки бетона является комбинированный, представляющий собой сочетание индукционного метода нагрева и предварительного разогрева бетонных смесей.

Применение такого комбинированного метода позволяет воспользоваться достоинствами обоих методов и компенсировать их недостатки.

Укладка разогретых бетонных смесей делает возможным применение индукционного нагрева и для слабоармированных конструкций, возводимых в стальной опалубке. С другой стороны, применение индукционного нагрева позволяет воспользоваться предварительным разогревом для укладки бетона в металлическую опалубку.

Использование индукционного нагрева дает возможность расширить область применения предварительного разогрева для конструкций с модулем поверхности до 10-12.

Особое внимание в период остывания следует обращать на утепление арматуры (и приарматурной зоны бетона), выходящей из прогретого бетона и контактирующей с холодным воздухом.

§ 8-4. Контроль температурного режима и набора прочности бетона

Основными контрольными параметрами при индукционном нагреве являются: сила тока в индукторе в различные периоды прогрева конструкций, температура бетона и прочность бетона.

За температурным режимом индукционного прогрева необходимо следить особенно тщательно, т.к. при отклонении от расчетных параметров возможен либо более интенсивный подъем температуры, либо превышение допустимого максимума температуры, что немедленно сказывается на прочностных показателях бетона и на сцеплении его с арматурой.

При скорости разогрева $10^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ и выше температура бетона должна измеряться ежечасно, при скорости разогрева от 5 до $10^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ – через два часа, и при изотермическом выдерживании – через каждые два часа.

При ручном регулировании изотермического выдерживания периодическим включением и выключением напряжения замеры температуры следует производить в течение первых двух часов – 2 раза в час, в последующие часы, после определения оптимального режима «включение-отключение» напряжения – через 2 часа.

Температура прогрева контролируется обычно с помощью технических термометров, устанавливаемых в скважинах или электронными термометрами.

Силу тока и напряжение достаточно измерять по два раза в период разогрева и в период изотермического выдерживания.

Фактическая прочность бетона определяется при понижении его температуры до 2-3°C с помощью склерометра или другими неразрушающими методами контроля.

§ 8-5. Техника безопасности

При производстве работ по индукционному прогреву следует соблюдать все требования по технике безопасности, изложенное в СНИП.

Монтажные работы по установке индукторов, наматывание и разматывание провода на прогреваемую конструкцию разрешается вести только до подключения проводов индуктора к клеммам источника питания.

Подключение индуктора к клеммам источника питания разрешается только при снятом с них напряжении и при условии, что индуктор на это время заземлен или включен в нулевую цепь.

§ 8-6. Примеры расчета тепловой обработки бетона индукционным методом

Пример 1. Выбрать режим и рассчитать параметры индукционного прогрева колонны сечением 0,4 x 0,4 м, высотой $h = 3$ м, армированной четырьмя стержнями диаметром 30 мм и жестким каркасом из двух шаеллеров № 16, сваренных полками. Деревянная опалубка имеет толщину 40 мм; начальная температура бетона 5°C; температура воздуха – минус 15°C; скорость ветра 3 м/с. Бетон марки М 200, приготовленный на портландцементе марки 400 с расходом 350 кг/м³. Требуемая относительная прочность к концу термообработки должна составлять 50% от R₂₈. Модуль поверхности конструкции составляет $M_n = 10$ м⁻¹; коэффициент теплопередачи опалубки $K = 2,67$ кВт/(м² · °С). Напряжение принимаем 49 В.

1. Максимальную температуру прогрева бетона для заданных условий принимаем 70°C.

2. Скорость подъема температуры бетона по табл.1 принимаем 10°C/ч.

3. Активная электрическая мощность, необходимая для разогрева бетона со скоростью 10°C/ч составит [см. формулы (4) и (5)]

$$P_{\text{ак}} = P_{\text{н}} U = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - P_5) = \left(\frac{C_b \gamma_b p}{3600} + \frac{\sum C_{\text{ми}} \gamma_{\text{ми}} \delta_{\text{ми}} M_{\text{ми}}}{3600} \cdot \frac{p}{2} + \frac{C_a \gamma_a p}{3600} + \frac{KM(t_u - t_{\text{н.с.}})}{1000} - 0,8 \right) U =$$

$$= \left\{ \frac{1,05 \cdot 2400 \cdot 10}{3630} + \frac{2,73 \cdot 700 \cdot 0,04 \cdot 10}{3630} \cdot \frac{10}{2} + \frac{2,67 \cdot 10 \cdot [70 - (-15)]}{1000} - 0,8 \right\} \cdot 0,48 = 4,6 \text{ кВт}$$

где $P_{\text{н}}$ - требуемая удельная электрическая мощность, кВт/м³;

P_1, P_2, P_3, P_4 - удельные мощности, необходимые соответственно для нагревания самого бетона, опалубки, арматуры и для восполнения теплопотерь в окружающую среду, кВт/м³;

P_3 - удельная мощность, эквивалентная экзотермическому тепловыделению, осредненно принятая равной $0,8 \text{ кВт/м}^3$;

$0,48$ - объем прогреваемого бетона, м^3 ;

C_b - удельная теплоемкость бетона, принимается равной $1,05 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

$C_{оп}$ - удельная теплоемкость материала опалубки или теплоизоляции, $\text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$; $C_{оп} = 2,73 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

C_a - удельная теплоемкость арматуры, $\text{кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

γ_b - плотность бетона, кг/м^3 ;

γ_a - плотность арматуры, кг/м^3 ;

$\gamma_{оп}$ - плотность опалубки или теплоизоляции, кг/м^3 ; $\gamma_{оп} = 700 \text{ кг/м}^3$;

K - коэффициент теплопередачи опалубки или теплоизоляции, $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$;

$t_{н.в.}$ - температура наружного воздуха, принимается средняя за время остывания бетона, $^\circ\text{C}$;

t_u - начальная температура бетона, град.;

$M_{оп}$ - модуль поверхности, $M_{оп} = \frac{F_{оп}}{V}$, м^{-1} ;

где $F_{оп}$ - площадь указанной поверхности, м^2 .

В связи с тем, что предварительный отопгрев арматуры производится до укладки бетона, составляющая P_3 в расчете не учитывается.

4. Активная поверхность S_a металла составит:

$$S_a = n\pi dh + 2(a_w + 2b_w) \cdot h = 4\pi \cdot 0,03 \cdot 3 + 2(0,16 + 2 \cdot 0,08) \cdot 3 = 3,05 \cdot \text{м}^2$$

где n - количество арматурных стержней, шт.;

d - диаметр арматурных стержней, м;

h - высота (длина) арматурных стержней, м;

a_w - высота швеллера, м;

b_w - ширина полки швеллера, м.

5. Удельная активная мощность ΔP определяется по формуле (5)

$$\Delta P = \frac{4,6}{3,05} = 1,51 \text{ кВт/м}^2$$

6. Напряженность магнитного поля H и удельное поверхностное сопротивление ρ_n , соответствующие найденному значению ΔP , определяем по графику рис. 8.4 так, как это показано пунктирной линией. В результате имеем:

определенному в п.5 значению $\Delta P = 1,51 \text{ кВт/м}^2$ соответствует $H = 4200 \text{ А/м}$ и $\rho_n = 8,75 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$.

7. Расчет параметров индукционной системы ведем по схеме индуктивной катушки с железом.

8. Для определения коэффициентов сопротивления F_s и Q_s предварительно вычисляем по формуле (3) глубину проникновения тока Δ_s :

$$\Delta_s = \frac{20 \cdot 10^{-8}}{8,75 \cdot 10^{-5}} = 0,0023 \text{ м} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

9. Коэффициенты сопротивлений F_s и Q_s определяем для швеллеров по графику рис. 8.5 и для стержневой арматуры по графику рис. 8.6.

Для швеллеров:

Средняя толщина сечения швеллера № 16 (по сортаменту) $\Delta = 0,007 \text{ м}$;

$$\text{отношение } \frac{2\Delta}{\Delta_s} = \frac{2 \cdot 0,007}{0,0023} = 6;$$

для $\frac{2\Delta}{\Delta_s} = 6$ величина $F_s = Q_s = 1$

Для стержневой арматуры:

Радиус арматурного стержня $\varnothing 30$ составляет $r = 0,015 \text{ м}$;

$$\text{отношение } \frac{r\sqrt{2}}{\Delta_s} = \frac{1,4 \cdot 0,015}{0,0023} = 9,1;$$

для $\frac{r\sqrt{2}}{\Delta_s} = 9,1$ величина $F_s = Q_s = 1$

10. Коэффициент формы индуктора m находим по графику рис. 8.7

при высоте индуктора $h_i = 300 \text{ см}$ отношение $\frac{h_i}{R_i} = \frac{3}{0,29} = 10$;

для $\frac{h_i}{R_i} = 10$ величина $m = 1$

11. Определяем сумму периметров сечения металла в сечении конструкции

$$\sum P_s = n_c \pi d_c + n_{\text{ж}} (a + 2b) = 4\pi \cdot 0,03 + 2 \cdot (0,16 + 2 \cdot 0,08) = 1,02 \text{ м},$$

где n - количество стержней арматуры в сечении, шт.;

d_c - диаметр стержневой арматуры, м;

$n_{\text{ж}}$ - количество элементов жесткого каркаса (швеллера), шт.;

a - высота швеллера, м;

b - ширина полки швеллера, м.

12. Определяем площадь сечения индуктора

$$S_i = (0,4 + 0,04 + 0,01)^2 = 0,2 \text{ м}^2$$

13. Условное активное сопротивление системы r_0 определяем по формуле (8):

$$r_0 = 1,1 \cdot 8,75 \cdot 10^{-5} \cdot 1,02 \cdot 1 = 9,81 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

14. Условное индуктивное сопротивление системы ωL_0 определяется по формуле (9):

$$\omega L_0 = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,2 + 8,75 \cdot 10^{-5} \cdot 1,02 = 17 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

15. Полное условное сопротивление системы Z_0 определяем по формуле (7):

$$Z_0 = \sqrt{(9,81 \cdot 10^{-5})^2 + (17 \cdot 10^{-5})^2} = 19,6 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

16. Число витков индуктора при выбранном напряжении 49В определяется по формуле (6):

$$N = \frac{49}{19,6 \cdot 10^{-5} \cdot 4200} = 59$$

17. Ожидаемая сила тока определяется по формуле (10): $I = \frac{4200 \cdot 3}{59} = 213 \text{ А}$

18. Коэффициент мощности системы $\cos \varphi$ определяется по формуле (11):

$$\cos \varphi = \frac{9,81 \cdot 10^{-5}}{19,6 \cdot 10^{-5}} = 0,5$$

19. Если в наличии имеется другой провод, например, медный сечением 35 мм^2 , у которого допустимая токовая нагрузка составляет 170 А, пересчитывается количество витков: $N = \frac{Hh}{I} = \frac{4200 \cdot 3}{170} = 74$

и напряжение, определяемое по формуле (6): $U = 74 \cdot 19,6 \cdot 10^{-5} \cdot 4200 = 62 \text{ В}$

20. Расчет параметров для стадии изотермического прогрева:

$$P_{as} = KM_{II}(t_{us} - t_{n,n}) \cdot \beta U = 2,67 \cdot 10 \cdot [70 - (-15)] \cdot 1,2 \cdot 0,48 = 1,15 \text{ кВт},$$

$$\text{тогда } \Delta P = \frac{1,15}{3,05} = 0,38 \text{ кВт/м}^2$$

При $\Delta P = 0,38 \text{ кВт/м}^2$ по графику рис. 8.1 находим $H = 1700 \text{ А/м}$; $\rho_n = 11 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$,

Z_0 определяем по формулам (7) – (9):

$$Z_0 = \sqrt{(1,1 \cdot 11 \cdot 10^{-5} \cdot 1,02 \cdot 1)^2 + (4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,2 \cdot 1 + 11 \cdot 10^{-5} \cdot 1,02 \cdot 1)^2} = 22,6 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$U_{us} = NZ \cdot H = 74 \cdot 22,6 \cdot 10^{-5} \cdot 1700 = 29 \text{ В};$$

$$I_{us} = \frac{Hh}{N} = \frac{1700 \cdot 3}{74} = 69 \text{ А}$$

Пример 2. Рассчитать электрические параметры индукционной установки для термообработки железобетонных труб диаметром 1000 мм, высотой 4,1 м при толщине стенок 60 мм. Кольцевая арматура $15\emptyset 10$ мм. Скорость подъема температуры бетона в период разогрева 25° С/ч . Изотермический прогрев - при $t 85^\circ \text{ С}$. Температура наружного воздуха 0° С . Начальная t бетона 15° С . Коэффициент теплопередачи ограждения $K = 4,64 \text{ кВт/(м}^2\text{С)}$. Удельное электросопротивление стали равно $20 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

1. Расчет ведется по схеме трансформатора с сердечником.

2. Тепловым расчетом устанавливается электрическая активная мощность, необходимая на период разогрева бетона: $P_{as} = 21 \text{ кВт}$.

3. Сумма периметров сечения металла

$$S_a = 2\pi 1,12 \cdot 4,1 + 15\pi 1,1\pi 1,0 = 3 \text{ м}^2.$$

4. Необходимая удельная активная мощность определяется по формуле (5)

$$\Delta P = \frac{21 \text{ кВт}}{30 \text{ м}^2} = 0,7 \text{ кВт/м}^2.$$

5. Удельной активной мощности $\Delta P = 0,7 \text{ кВт/м}^2$ соответствует, напряженность магнитного поля $H = 2350 \text{ А/м}$ (рис. 8.7).

6 Площадь зазора между индуктором на магнитопроводе и нагреваемым изделием при радиусе индуктора 25 см составляет

$$S_{\text{з}} = \pi(0,56^2 - 0,25^2) = 0,78 \text{ м}^2.$$

7. Полная мощность системы определяется по формуле (14):

$$P_{\text{с}} = \sqrt{1,2 \cdot 21^2 + (1,1 \cdot 21 + 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot 4,1 \cdot 50 \cdot 0,78 \cdot 2350^2)^2} = 38 \text{ кВт} \cdot \text{А}.$$

8. При выбранном напряжении 220 В число витков индуктора (намагничивающей обмотки) определяется по формуле (13):

$$N = 1,4 \cdot 10^{-3} \frac{2350 \cdot 4,1 \cdot 220}{38} = 78.$$

9. Сила тока в индукторе определяется по формуле (15):

$$I = \frac{38}{220} 10^3 = 170 \text{ А}.$$

10. Коэффициент мощности установки согласно формуле (16):

$$\cos \varphi = 1,1 \frac{21}{38} = 0,6$$

Глава 9. ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗА ПРОИЗВОДСТВОМ БЕТОННЫХ РАБОТ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Возведение зданий и сооружений из монолитного железобетона в холодное время года требует особого внимания к обеспечению высокого качества конструкций. В этих условиях весьма важно организовать эффективную систему контроля за производством бетонных работ и характера нарастания прочности бетона в процессе твердения и после распалубки.

Как известно причины аварий зданий и сооружений, возводимых из монолитного железобетона в зимнее время года, в основном происходят от преждевременного замораживания бетона применительно к тем или иным конструкциям. Разумеется, большое влияние на это может оказать некачественный бетон или нарушение технологии его выдерживания в конструкции, но это относится и к летним условиям, хотя зимой их влияние оказывается более опасным. Согласно СНиП 3.03.01-87, критическая прочность бетона зависит от марки бетона и условий эксплуатации конструкций (табл.9.1).

Таблица 9.1

Критические прочности бетона без добавок и с добавками антифризами

Класс (марка) бетона, R_{28}	Критическая прочность к моменту замерзания, % от R_{28}	
	без добавок	с добавками противоморозными (антифризами)
В 7,5-В 10 (100 до 150)	50	30
В 12,5-В 25 (150-300)	40	25
В 30 и выше (400)	30	20
Для преднапряженных конструкций	80	-
Для конструкций, подвергающихся попеременному замораживанию и оттаиванию в водонасыщенном состоянии	70	-

Более жесткие требования следует предъявлять к пролетным конструкциям. Так в перекрытиях пролетом до 6м бетон не следует замораживать до достижения 70%-ной прочности от R_{28} , а пролетом более 6м – достижения не менее 80% от R_{28} .

Следует однако подчеркнуть, что к моменту загрузки конструкций проектной нагрузкой бетон должен достигнуть 100%-ной прочности от R_{28} .

Практика строительства показывает, что 2,5% от затрат на жилищное строительство уходит на ликвидацию брака строймонтажных работ и 5% на преждевременный ремонт зданий в первые три года эксплуатации. Разумеется, приведенные цифры средние, но для зимнего строительства они наиболее реальны.

Контроль бетонных работ начинается с поступления на объект бетонной смеси, которая по своему составу и пластичности должна соответствовать проектным данным. Состав указывается в паспорте, которым обязатель-

но сопровождается бетонная смесь. Пластичность, если она вызывает подозрение о несоответствии паспортным данным, должна проверяться на стройплощадке лабораторией или ответственным за производство бетонных работ, в случае отсутствия на объекте лаборатории. Кроме того, обязательно отбираются пробы бетона, из которых готовятся образцы и выдерживаются в нормальных условиях.

Перед укладкой бетонной смеси в опалубку следует удостовериться в чистоте арматуры и поверхности палубы. Совершенно не допускается попадание в установленную опалубку снега и намерзания его на стальной арматуре. В случае все же попадания снега в опалубку, следует ее продуть горячим воздухом от теплогенератора и совершенно не допускается применение для этой цели пара.

Во избежание намерзания бетонной смеси на палубу и арматуру при низких температурах среды в бетонную смесь целесообразно вводить при приготовлении (2-4% от массы цемента) противоморозную добавку.

Сразу после укладки в опалубку и уплотнения бетона неопалубленные поверхности конструкции должны быть обязательно утеплены по пароизоляции и начинается прогрев методами, указанными в проекте производства работ. При этом должны строго соблюдаться мягкие режимы прогрева и осуществляться температурный контроль за выдерживанием бетона построечной лабораторией или при ее отсутствии – ответственным за производство бетонных работ.

Помимо температурного контроля за выдерживанием бетона необходимо вести наблюдение за нарастанием его прочности. Такой контроль осуществляется неразрушающими методами, которые надо хорошо знать.

Контроль качества бетона неразрушающими методами, помимо нарастания его прочности, позволяет определять прочность бетона в любой конструкции, определять степень однородности бетона в конструкциях, выявлять дефекты в структуре бетона и контролировать качество стыков.

В соответствии с действующими в настоящее время нормативными документами для контроля прочности бетона монолитных железобетонных конструкций, могут использоваться следующие методы:

- Метод определения прочности по контрольным образцам (ГОСТ 10180-90).
- Неразрушающие методы контроля – метод отрыва со скалыванием (ГОСТ 22690-88), ультразвуковой метод при сквозном прозвучивании (ГОСТ 17624-87), метод скалывания ребра (ГОСТ 22690-88).
- Метод определения прочности по образцам, отобраным из конструкций (ГОСТ 28570-90).

Последний из них применяется, как правило, при инспекционных и экспертных испытаниях прочности бетона в конструкциях, вновь возводимых и реконструируемых зданий и сооружений.

Кроме перечисленных методов допускается определение прочности бетона другими методами неразрушающего контроля (метод упругого отскока, метод пластической деформации, метод ударного импульса, метод испытания бетона в пробах, отобранных из конструкций) только при согласовании с головными научно-исследовательскими организациями (ГОСТ 18105-86).

Выбор того или иного метода определения прочности бетона при возведении монолитных железобетонных конструкций зависит от возможности исполнителей строго выполнять требования соответствующих норм, стандартов и рекомендаций, относящихся к данному методу определения прочности.

Опыт практической работы показывает, что метод определения прочности бетона по контрольным образцам дает достаточно точные результаты при естественном твердении бетона (обычно в теплое время года).

При использовании прогрева для ускорения твердения бетона обычно не удается точно выдержать температурно-влажностный режим твердения бетона образцов (особенно это относится к вертикальным конструкциям и к массивным конструкциям). Различие в режимах выдерживания образцов и конструкций приводит к серьезным ошибкам в определении прочности бетона в конструкциях.

Кроме того, объем контроля по образцам в соответствии с ГОСТ 18105-86 часто оказывается очень мал по сравнению с объемом укладываемого бетона, т.к. стандарт требует отбора всего 1-й пробы (3 образца куба) от объема бетона, уложенного на стройплощадке за одни сутки (п.2.2).

При использовании механических и ультразвуковых методов контроля прочности бетона обеспечивается достаточная быстрота и точность получения данных о прочности бетона непосредственно в конструкциях. Но при этом для всех используемых приборов должны быть построены градуировочные зависимости для данного бетона. Эти зависимости должны регулярно проверяться и обновляться. Отступления от правил могут приводить к ошибкам в 2 и больше раз.

Метод отрыва со скалыванием и метод скалывания ребра имеют преимущества по сравнению с другими методами неразрушающего контроля, поскольку являются прямыми, позволяют использовать универсальную градуировочную зависимость и определять прочность бетона не на поверхности, а в более глубоких слоях.

При контроле нарастания прочности бетона по температурным режимам выдерживания очень важно соблюдать правила устройства температурных скважин, правила ухода за ними, правила измерения температуры. Отступление от этих правил также приводит к серьезным ошибкам.

В соответствии с ныне действующими нормативными требованиями определение прочности бетона следует выбирать с учетом его проектной прочности по таблице 9.2.

Таблица 9.2

Неразрушающие методы определения прочности бетона

Метод	Предельные значения прочности бетона, МПа
Отрыв со скалыванием	5-100
Скалывание ребра	5-70
Упругий отскок и пластическая деформация	5-60
Упругий импульс	10-70
Отрыв	5-60
Ультразвуковой метод	7,5-35

Проведенные в последнее время исследования выявили возможность применения для неразрушающего контроля прочности бетона монолитных конструкций ультразвуковой метод при измерении способом поверхностного прозвучивания.

Прочность бетона определяют по градуировочной зависимости. Градуировочная зависимость устанавливается между прочностью бетона и косвенной характеристикой прочности.

Для испытания методом отрыва со скалыванием, методом скалывания ребра, как было сказано выше, допускается использовать единые градуировочные зависимости, приведенные в Приложениях 5 и 6 ГОСТ 22690-88.

Для испытания методом упругого отскока, пластической деформации, ударного импульса и отрыва градуировочные зависимости устанавливаются на основании данных определения косвенных характеристик прочности в образцах-кубах и последующих их испытаний на прессе. К сожалению, на практике во многих случаях невозможно выполнить некоторые требования ГОСТ 22690-88 по соотношению температуры, влажности и возраста бетона образцов и испытываемой конструкции. Поэтому для построения градуировочной зависимости допускается использовать в качестве прямого метода определения прочности метод отрыва со скалыванием.

Градуировочную зависимость устанавливают на основании параллельных испытаний одних и тех же участков конструкций вначале одним из неразрушающих методов (ультразвуковой, упругого отскока, ударного импульса), затем методом отрыва со скалыванием.

Построение градуировочной зависимости возможно по данным неразрушающих испытаний участков конструкций и испытанием образцов, вырезанных из тех же участков конструкции, в соответствии с ГОСТ 28570-90.

Построение градуировочной зависимости по данным испытаний кубов и неразрушающих методов ведется в соответствии с ГОСТ 22690-88 и ГОСТ 17624-87.

При выборе участков для испытания косвенным методом следует учитывать ряд факторов, которые могут исказить показание прибора. Так, при испытаниях методом упругого отскока, упругого импульса и пластической деформации необходимо следить за тем, чтобы поверхность бетона была очищена от краски, мусора, песка и т.п. кроме того, шероховатую поверхность необходимо зачищать с помощью наждачного камня. Такие требования к чистоте поверхности предъявляются при определении прочности бетона ультразвуковым методом способом сквозного прозвучивания.

При поверхностном прозвучивании влияние перечисленных факторов значительно меньше, но чрезвычайно большое влияние на результаты измерений оказывают наличие поверхностных трещин в бетоне (в том числе и малозаметных) между источником сигналов и приемником. Влияние этого фактора устраняется подбором такого положения источника и приемника, при котором время прохождения сигнала будет наименьшим. Искажения в показаниях прибора может внести наличие значительных неровностей поверхности между приемником и источником сигналов. Отмечаются случаи нестабильности показаний ультразвуковых приборов на участках, испыты-

вающих вибрацию от работы отбойных молотков, а также при наличии мощных радиосигналов и других источников переменного магнитного поля.

Погрешности в результаты измерений вносит высокая влажность бетона. При испытании влажного бетона ультразвуковым методом полученное значение прочности может оказаться заниженным. Это относится к испытанию свежераспалубленного, еще влажного бетона или бетона, который был покрыт слоем воды.

В зимнее время особые условия создает сочетание влажности бетона с отрицательной температурой. ГОСТ 22690-88 устанавливает температуру бетона, при которой допускается проводить измерения прочности неразрушающими методами не ниже -10°C . Условия выдерживания конструкции при отрицательных температурах перед проведением испытаний, которые оговорены в ГОСТ, не всегда обеспечивают необходимую прочность результатов. При проведении неразрушающего контроля прочности при отрицательных температурах необходимо следить за состоянием поверхности конструкции. Результаты, полученные для бетонов, замороженных в раннем возрасте, а также замороженных в более позднем возрасте, но имеющих низкую прочность, пропитанных водой при замораживании, будут недостоверными. Практика показывает, что вполне можно доверять результатам для бетона, имеющего сухую поверхность, температуру до -10°C и ориентировочную прочность 50% и выше от проектной.

Использование ультразвукового метода дает возможность определять глубину поверхностной трещины. Для этого на равных расстояниях и перпендикулярно оси трещины устанавливают излучатель и приемник ультразвуковых волн и определяют время прохождения ультразвука t_1 через трещину. Затем определяют время прохождения ультразвука t_2 на ненарушенном участке бетона образца. Глубину трещины определяют по формуле:

$$y = \sqrt{0,25b^2 \frac{t_1^2}{t_2^2} - a^2}$$

где $b = 2a$ - база между излучателем и приемником ультразвуковых сигналов.

Подробное применение ультразвукового метода изложено в Рекомендациях по контролю прочности бетона монолитных конструкций ультразвуковым методом способом поверхностного прозвучивания (МДС 62-2.01).- М., НИИЖБ.

Глава 10. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА БЕТОННЫХ РАБОТ И ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Бетоны и конструкции из них будут применяться в строительстве многие десятилетия, а возможно и столетия, поэтому проблема интенсификации бетонных работ и их твердения является актуальной проблемой не только в настоящее время, но и в будущем. Это диктуется темпами строительства, реконструкцией зданий и сооружений в связи с устаревшей планировкой и формой или исчерпавших свой жизненный ресурс. Благодаря своим уникальным свойствам бетон все большее внимание привлекает архитекторов и скульпторов, поскольку его пластические свойства в раннем возрасте и долговечность при эксплуатации открывают широкие возможности для изготовления сложнейших изделий и композиций.

Интенсификация бетонных работ будет развиваться в разных направлениях – в появлении новых вяжущих материалов; эффективных химических добавок разного назначения; совершенствовании технологии работ, включая арматурные и опалубочные работы; ускорении твердения бетона; в эффективном контроле качества. Одним из важнейших направлений будет автоматизация строительных процессов и система управления производством работ.

Вяжущее является важнейшим компонентом бетона и от темпов его взаимодействия с водой затворения и затвердевания зависит продолжительность общего цикла бетонных работ. В настоящее время появилось много различных видов быстротвердеющих цементов, однако, или они имеют очень короткие сроки схватывания, что затрудняет работу с ними, или бетоны на их основе не всегда отвечают требованиям по долговечности и в первую очередь по морозостойкости. Есть вяжущие, обеспечивающие уже через 2-3 часа достижение бетоном требуемой прочности. Их используют для ремонта взлетно-посадочных полос в аэропортах без остановки движения самолетов. Но эти вяжущие очень дорогие и в настоящее время их широкое применение маловероятно.

В перспективе для бетонов необходимы особо быстротвердеющие вяжущие, бетоны на основе которых отличались бы необходимыми для операций с ними сроками схватывания, быстрым твердением и высокой долговечностью при эксплуатации в конкретной среде. В принципе разработка таких вяжущих вполне реальна, но обычный минералогический и химический состав применяемых портландцементов для этих целей не совсем приемлем. Решить задачу позволят химические добавки разного назначения, которые могут придать бетону те необходимые свойства, которые от него требуются при работе в период изготовления конструкций и во время их эксплуатации.

В направлении разработки химических добавок ведутся большие исследования в разных странах, но полученные составы пока не обеспечивают требуемых темпов твердения бетона особенно при низких положительных и тем более отрицательных температурах. Часто рекламируемые зарубежными фирмами добавки не всегда при их реализации соответствуют рекламе.

Крайне высокая надобность в добавках ускорителях твердения, которые в купе с суперпластификаторами могли бы быть весьма эффективными. Следует вести разработки композиционных добавок, в состав которых могли бы включаться полимерные компоненты и другие реагенты различного действия.

Высокоактивные и быстротвердеющие вяжущие, а также эффективные химические добавки в перспективе помогут отказаться от тепловой обработки при низких положительных температурах и существенно сократить затраты энергоресурсов на прогрев бетона при отрицательных температурах среды.

Тепловая обработка останется наиболее эффективным методом ускорения твердения бетона при отрицательных температурах среды. Вместе с тем, начиная с середины столетия, начнет широко применяться для этих целей энергия солнца и ветра, что существенно снизит затраты на прогрев бетона не только при возведении монолитных конструкций, но при производстве сборных изделий на заводах и полигонах в любое время года. Основные виды термообработки бетона останутся с использованием электрической энергии, позволяющей легко управлять процессами термообработки бетона и их автоматизировать. Мягкие режимы прогрева и остывания бетона в холодную погоду – залог высокого качества возводимых конструкций.

Заметно преобразуется технология возведения зданий и сооружений из монолитного бетона. В первую очередь это касается арматурных работ. Сейчас почти 60% они выполняются вручную, что делает процесс армирования длительным и трудоемким (до 10-12 человеко-дней на 1 т смонтированных конструкций). На передовых стройках Москвы, например, в системе Главмосстроя, Главпромстроя и др. положение лучше (3-4 человеко-дня на 1 т), но пока уступает по некоторым показателям на эти работы в крупных строительных организациях технически развитых стран. Одним из путей совершенствования арматурных работ является применение готовых арматурных каркасов и сеток, сделанных по заказам на заводах или в механических мастерских. На стройках такие каркасы быстрее и дешевле устанавливать в проектное положение и при монтаже останется только их стыковка с ранее установленными арматурными элементами и выверка. Иногда приходится армировать конструкции из отдельных арматурных стержней непосредственно на объекте (например, при малом объеме работ). В этом случае трудоемкая ручная вязка элементов в каркас будет заменена на вязку с применением специального приспособления, позволяющего этот процесс ускорить во много раз. Сейчас такие приспособления разработаны, апробированы, хорошо себя зарекомендовали и им надо дать широкую дорогу для внедрения и на отечественных стройках.

Стыкование арматурных элементов путем нахлеста одного стержня с другим и значительным их перепуском с последующей вязкой приводит к существенным перерасходам металла. Замена таких соединений на соединения с помощью муфт при винтовой арматуре или путем обжимных муфт исключит перерасход стержневой арматурной стали и сделает стыковые соединения более надежными и значительно быстрее выполняемыми.

При возведении однотипных объектов, особенно в жилищном строительстве, целесообразно наряду с монолитом некоторые конструкции зданий

выполнять из сборных железобетонных элементов. К таковым можно отнести лестничные марши, плиты балконов, лоджий и эркеров с элементами их ограждения; архитектурные детали; облицовочные элементы и т.п. Такие элементы выполнять непосредственно на месте монолитными сложно, требуется специальная опалубка, а зимой возникают проблемы с их прогревом.

При завершении армирования вертикальных конструкций перед установкой опалубки, или горизонтальных конструкций до бетонирования, будет особое внимание обращать на обеспеченне защитного слоя бетона в конструкциях. Фиксаторы для этой цели давно разработаны, на производстве применяются и сейчас, но не везде и не всегда, что четко обнаруживается при распалубке конструкций.

Качество опалубки оказывает большое влияние на качество поверхности возводимых монолитных конструкций. При этом весьма важны ровность и гладкость поверхности палубы, а также качественная смазка, полностью исключая прилипание к ней бетона и облегчающая очистку палубы после распалубки (при хорошей смазке очистка практически не требуется, кроме легкой протирки). Особое внимание будет обращено на стыковые соединения опалубки. В стыках соединяемые элементы, должны быть тщательно подогнаны, чтобы на поверхности распалубленных конструкций не было видно неровных швов или натеков бетона. Соединение щитов между собой будет осуществляться быстро и надежно с помощью замков, надежные конструктивные решения которых уже имеются и такие замки уже применяются. С их помощью легко и быстро осуществляется распалубка готовых конструкций. Будут совершенствоваться и материалы для опалубки. Большие перспективы у опалубок из полимерных термостойких материалов, в т.ч. с вмонтированными электронагревателями.

Для зимних работ будет применяться греющая утепленная опалубка с гибкими, пластинчатыми или ленточными нагревателями, гибкие греющие маты. Процесс прогрева будет автоматизирован с тщательным контролем за режимом и температурой прогрева. При аккуратной эксплуатации опалубки ее оборачиваемость может достигать нескольких сот раз, а металлической – еще больше.

Одним из решающих этапов возведения монолитных конструкций является их выдерживание до достижения бетоном установленной распалубочной или проектной прочности. Помимо интенсификации твердения особенно в холодную погоду, необходимо к минимуму сводить теплопотери и влагопотери из бетона выдерживаемой конструкции в окружающую среду. Паро- и теплоизоляция неопалубленных поверхностей является неременным условием обеспечения высокого качества конструкций и экономного расходования затрачиваемой энергии на термообработку. В качестве пароизоляции лучшим решением является нанесение на поверхность бетона после его укладки пленкообразующих составов, которые надежно защитят его от больших влагопотерь. На пленкообразующее покрытие укладывается эффективная теплоизоляция, не впитывающая влагу и хорошо переносящая низкую температуру в сильные морозы. Уйдут в прошлое рубероид и пергамин, при-

меняющиеся до сих пор в качестве пароизоляции, а также шлак, опилки, минеральная вата, пенополистирол и другие плитные утеплители.

Пленкообразующие составы очень удобны для защиты бетона от влагопотерь при возведении монолитных конструкций в жаркую погоду летом. Полностью отпадет надобность в укрытии бетона влажными брезентами или опилками и тем более совершенно не допустимого метода-поливки бетона.

Пленкообразующие составы удобны для предохранения от влагопотерь быстро распалубливаемых вертикальных конструкций (колонны, перегородки, стены, пилоны и т.п.). сразу после снятия опалубки на поверхность бетона наносятся пленкообразующие составы, надежно защищающие бетон от влагопотерь и высыхания при любой высокой температуре и низкой влажности среды.

Высокая механизация строительных процессов, автоматическое управление отдельными технологическими переделами, пооперационный автоматический контроль за всеми основными операциями, связанными с бетоном, четкая организация работ, чистота и порядок на строительной площадке. Так будет выглядеть в недалеком будущем возведение зданий и сооружений из монолитного железобетона высокого качества, надежности и долговечности.

Развитие экономного и качественного отечественного строительства невозможно без глубоких научных исследований и разработки на их основе новых эффективных материалов, конструкций, технологии работ, нормативных и инструктивных документов.

Нормативные документы должны быть государственными и являться обязательными для любой проектной, производственной и научно-исследовательской организации независимо от формы собственности возводимых объектов. Несоблюдение требования государственного стандарта чревато серьезными последствиями для качества, надежности и долговечности возводимых зданий и сооружений и виновные в этом должны привлекаться к строгой ответственности, вплоть до уголовной.

Особое внимание должно уделяться возведению уникальных объектов: крупные торговые, культурно-развлекательные и зрелищные центры, аквапарки, крытые стадионы, выставочные комплексы, крупные офисные здания и т.п. Такие объекты рассчитаны на посещение или работу в них множества людей и их безопасность особенно должна быть чрезвычайно высокой. Сооружение их должно осуществляться при научном сопровождении специалистов научно-исследовательских организаций с тщательным контролем качества бетона и других применяемых материалов и всех технологических переделов при производстве строительных работ.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Ориентировочные величины потребной и выделяемой электрической мощности при электропрогреве бетона

В таблицах 1.1 – 1.2 приведены ориентировочные величины удельной электрической мощности, необходимые для разогрева и изотермического прогрева бетона при электропрогреве, в зависимости от температуры окружающей среды, температуры прогрева и скорости разогрева бетона, модуля поверхности конструкции. В таблицах приведены мощности для прогрева и разогрева бетона в опалубке с коэффициентом теплопередачи (K) равным $3,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

В таблицах 1.3 – 1.6 приведены ориентировочные величины выделяемой удельной электрической мощности при периферийном электропрогреве бетона полосовыми электродами в зависимости от подводимого напряжения, удельного электрического сопротивления бетона, ширины полосовых электродов и расстояния между ними.

Данные таблиц целесообразно использовать для предварительных расчетов при проектировании электропрогрева бетона.

Таблица 1.1

Удельная электрическая мощность, требуемая в период изотермического прогрева бетона, кВт/м^3

Температура воздуха, $^\circ\text{C}$	Мощность при прогреве конструкций с модулем поверхности м^{-1}											
	5			10			15			20		
	Температура прогрева, $^\circ\text{C}$											
	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
20	0,3	0,6	1,0	0,5	1,1	1,6	0,8	1,6	2,2	1,0	2,1	3,2
10	0,5	0,8	1,1	0,8	1,3	1,9	1,2	2,0	2,8	1,6	2,7	3,7
0	0,6	1,0	1,3	1,1	1,6	2,1	1,6	2,4	3,2	2,1	3,2	4,3
-10	0,8	1,1	1,4	1,4	1,9	2,4	2,0	2,3	3,6	2,8	3,7	4,8
-20	1,0	1,3	1,6	1,7	2,1	2,7	2,4	3,2	4,0	3,2	4,3	5,3
-30	1,1	1,4	1,8	2,0	2,4	2,9	2,8	3,6	4,4	3,7	4,8	5,9

Таблица 1.2

Удельная электрическая мощность, необходимая для разогрева бетона, кВт/м³

Температура воздуха,	Скорость подъема температуры, °С/ч	Мощность при прогреве конструкций с модулем поверхности, м ⁻¹											
		5			10			15			20		
		Температура изотермического прогрева, °С											
		40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80
20	5	3	3,2	3,4	3,2	3,5	3,8	3,9	3,9	4,3	3,7	4,3	4,8
	10	6,8	7	7,1	7,2	7,4	7,7	7,6	8,1	8,5	8,1	8,7	9,2
	15	10,5	10,7	10,9	11,1	11,4	11,7	11,8	12,2	12,7	12,5	13,4	13,6
	20	14,3	14,5	14,7	15,1	15,3	15,6	16	16,4	16,8	16,9	17,5	18
10	5	3,2	3,4	3,5	3,5	3,8	4,05	4,3	4,3	4,8	4,5	4,8	5,4
	10	7	7,1	7,3	7,4	7,7	8	8,1	8,5	8,9	8,7	9,2	9,8
	15	10,7	10,9	11	11,1	11,4	11,7	12,2	12,7	13,1	13,6	13,5	13,2
	20	14,5	14,7	14,8	15,3	15,6	15,9	16,4	16,8	17,3	17,5	18	18,6
0	5	3,3	3,5	3,7	3,8	4	4,3	4,3	4,7	5,2	4,8	5,4	6
	10	7,1	7,3	7,4	7,7	8	8,3	8,4	8,9	9,3	9,3	9,8	10,4
	15	10,9	11	11,2	11,4	12	12,2	12,7	13,1	13,5	13,6	14,2	14,8
	20	14,7	14,8	15	15,6	15,9	16,2	16,8	17,2	17,7	18	18,6	19,2
- 10	5	3,5	3,7	3,8	4	4,3	4,6	4,7	5,1	5,6	5,4	5,9	6,5
	10	6,4	7,4	7,6	8	8,3	8,6	8,9	9,3	9,7	9,8	10,3	10,9
	15	11	11,2	11,4	12	12,2	12,5	13	13,5	13,9	11,2	14,7	15,3
	20	14,8	15	15,2	15,9	16,2	16,5	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,7
- 20	5	3,7	3,8	4	4,3	4,6	4,9	5,1	5,5	6	5,9	6,5	7,1
	10	7,4	7,6	7,8	8,3	8,6	8,7	9,3	9,7	10,1	10,3	10,9	11,5
	15	11,2	11,4	11,7	12,2	12,5	12,8	13,5	13,9	14,3	14,7	15,3	15,9
	20	15	15,2	15,3	16,2	16,5	16,7	16,6	18,1	18,5	19,1	19,7	-
- 30	5	3,8	4	4,2	4,6	4,9	5,07	5,5	6	6,4	6,5	7	7,6
	10	7,6	7,8	7,9	8,6	8,8	9,1	9,7	10,1	10,6	10,9	11,1	12
	15	11,6	11,7	11,9	12,8	13,1	13,1	13,9	14,3	14,7	15,3	15,8	16,4
	20	15,2	15,3	15,5	16,5	16,7	17	18,1	18,5	18,9	19,7	-	-

Таблица 1.3

Выделяемая удельная электрическая мощность, при прогреве бетона полосовыми электродами с односторонним размещением (толщина конструкции 10 см), кВт/м³

Напряжение В	Среднее удельное сопротивление, Ом.см	Мощность, кВт/м ³							
		Расстояние между осями электродов, см							
		10		20		30		40	
		Ширина электродов, см							
		2	5	2	5	2	5	2	5
51	200	—	—	<u>17,27</u> 14,93	<u>22,49</u> 20,38	<u>9,20</u> 8,09	<u>11,14</u> 10,34	<u>5,64</u> 5,12	<u>6,65</u> 6,26
	800	<u>11,76</u> 9,69	<u>17,19</u> 14,84	<u>4,32</u> 3,73	<u>5,62</u> 5,09	<u>2,28</u> 2,02	<u>2,79</u> 2,59	<u>1,41</u> 1,28	<u>1,66</u> 1,57
	1600	<u>4,88</u> 4,84	<u>8,59</u> 7,42	<u>2,16</u> 1,87	<u>2,81</u> 2,54	<u>1,14</u> 1,01	<u>1,39</u> 1,29	<u>0,71</u> 0,64	<u>0,83</u> 0,78
60	200	—	—	<u>23,91</u> 20,66	<u>31,12</u> 28,20	<u>12,59</u> 11,20	<u>15,42</u> 14,32	<u>7,81</u> 7,08	<u>9,2</u> 8,67
	800	<u>16,28</u> 13,41	<u>23,79</u> 20,54	<u>5,98</u> 6,16	<u>7,78</u> 7,05	<u>3,15</u> 2,80	<u>3,86</u> 3,58	<u>1,95</u> 1,77	<u>2,30</u> 2,17
	1600	<u>8,14</u> 6,70	<u>11,89</u> 10,27	<u>2,99</u> 2,58	<u>3,89</u> 3,53	<u>1,57</u> 1,40	<u>1,93</u> 1,79	<u>0,98</u> 0,89	<u>1,15</u> 1,08
70	200	—	—	—	—	<u>17,14</u> 15,25	<u>20,99</u> 19,49	<u>10,63</u> 9,64	<u>12,52</u> 11,8
	800	<u>22,16</u> 18,25	<u>32,38</u> 27,96	<u>8,14</u> 7,03	<u>10,59</u> 9,60	<u>4,28</u> 3,81	<u>5,25</u> 4,87	<u>2,66</u> 2,41	<u>3,13</u> 2,95
	1600	<u>11,08</u> 9,13	<u>16,19</u> 13,98	<u>4,07</u> 3,52	<u>5,30</u> 4,80	<u>2,14</u> 1,91	<u>2,62</u> 2,44	<u>1,33</u> 1,21	<u>1,57</u> 1,48
87	200	—	—	—	—	—	—	<u>16,41</u> 14,89	<u>19,34</u> 18,23
	800	—	—	<u>12,57</u> 10,86	<u>16,36</u> 14,82	<u>6,62</u> 5,89	<u>8,10</u> 7,53	<u>4,10</u> 3,72	<u>4,48</u> 4,56
	1600	<u>17,11</u> 14,09	<u>25,01</u> 21,59	<u>6,28</u> 5,43	<u>8,18</u> 7,41	<u>3,31</u> 2,94	<u>4,05</u> 3,76	<u>2,05</u> 1,86	<u>2,42</u> 2,28
106	200	—	—	—	—	—	—	<u>24,37</u> 22,10	<u>28,71</u> 27,06
	800	—	—	<u>18,66</u> 16,12	<u>24,29</u> 22,01	<u>9,83</u> 8,74	<u>12,03</u> 11,17	<u>6,09</u> 5,52	<u>7,18</u> 6,36
	1600	<u>25,41</u> 20,92	<u>37,12</u> 32,05	<u>9,33</u> 8,06	<u>12,14</u> 11,00	<u>4,91</u> 4,37	<u>6,02</u> 5,59	<u>3,06</u> 2,76	<u>3,59</u> 3,38
127	200	—	—	—	—	—	—	—	—
	800	—	—	—	—	<u>14,11</u> 12,55	<u>17,27</u> 16,03	<u>8,74</u> 7,93	<u>10,3</u> 9,71
	1600	—	—	<u>13,39</u> 11,57	<u>17,43</u> 15,80	<u>7,05</u> 6,27	<u>8,64</u> 8,02	<u>4,37</u> 3,97	<u>5,15</u> 4,86

Примечание. В числителе приведена мощность для трехфазного тока, в знаменателе – для однофазного.

Таблица 1.4

Выделяемая удельная электрическая мощность, при прогреве бетона полосовыми электродами с односторонним размещением (толщина конструкции 20 см), кВт/м³.

Напряже ние В	Среднее удельное сопротивл ение, Ом.см	Мощность, кВт/м ³							
		Расстояние между осями электродов, см							
		10		20		30		40	
		Ширина электродов, см							
		2	5	2	5	2	5	2	5
51	200	—	—	<u>9,49</u> 7,68	<u>12,73</u> 10,59	<u>5,25</u> 4,57	<u>7,09</u> 6,07	<u>3,67</u> 3,11	<u>4,57</u> 3,99
	800	<u>5,55</u> 4,35	<u>7,90</u> 6,32	<u>2,37</u> 1,92	<u>3,18</u> 2,65	<u>1,38</u> 1,14	<u>1,77</u> 1,52	<u>0,92</u> 0,75	<u>1,14</u> 1,00
	1600	<u>2,78</u> 2,17	<u>3,95</u> 3,16	<u>1,19</u> 0,96	<u>1,59</u> 0,57	<u>0,69</u> 0,57	<u>0,89</u> 0,76	<u>0,46</u> 0,38	<u>0,57</u> 0,50
60	200	—	—	<u>13,13</u> 10,62	<u>17,62</u> 14,66	<u>7,63</u> 6,33	<u>9,81</u> 8,40	<u>5,08</u> 4,30	<u>6,33</u> 5,53
	800	<u>7,69</u> 6,02	<u>10,94</u> 8,74	<u>3,28</u> 2,66	<u>4,40</u> 3,66	<u>1,91</u> 1,58	<u>2,45</u> 2,10	<u>1,27</u> 1,07	<u>1,58</u> 1,38
	1600	<u>3,84</u> 3,01	<u>5,47</u> 4,37	<u>1,64</u> 1,33	<u>2,20</u> 1,83	<u>0,95</u> 0,79	<u>1,23</u> 1,05	<u>0,64</u> 0,54	<u>0,79</u> 0,69
70	200	—	—	<u>17,88</u> 14,46	<u>23,98</u> 19,95	<u>10,39</u> 8,62	<u>13,36</u> 11,43	<u>6,91</u> 5,85	<u>8,62</u> 7,53
	800	<u>10,46</u> 8,92	<u>14,89</u> 11,90	<u>4,47</u> 3,62	<u>6,00</u> 4,00	<u>2,60</u> -	<u>3,34</u> -	<u>1,73</u> -	<u>2,15</u> -
	1600	<u>5,23</u> 4,10	<u>7,44</u> 5,95	<u>2,24</u> 1,81	<u>3,00</u> 2,49	<u>1,3</u> 1,08	<u>1,67</u> 1,43	<u>0,87</u> 0,73	<u>1,08</u> 0,94
87	200	—	—	—	—	<u>16,05</u> 13,31	<u>20,63</u> 17,65	<u>10,68</u> 9,04	<u>13,31</u> 11,62
	800	<u>16,16</u> 12,65	<u>22,99</u> 18,38	<u>6,90</u> 5,58	<u>4,01</u> 7,70	<u>5,16</u> 3,33	<u>2,67</u> 4,41	<u>2,67</u> 2,26	<u>3,33</u> 2,97
	1600	<u>8,08</u> 6,33	<u>11,50</u> 9,19	<u>3,45</u> 2,79	<u>4,63</u> 3,85	<u>2,01</u> 1,67	<u>2,58</u> 2,21	<u>1,34</u> 1,13	<u>1,66</u> 1,45
106	200	—	—	—	—	<u>23,83</u> 19,73	<u>30,63</u> 26,21	<u>15,85</u> 13,42	<u>19,76</u> 17,25
	800	<u>23,99</u> 18,78	<u>34,14</u> 27,29	<u>10,25</u> 8,29	<u>13,75</u> 11,44	<u>9,96</u> 4,94	<u>7,66</u> 5,55	<u>3,96</u> 3,35	<u>4,94</u> 4,31
	1600	<u>12,00</u> 9,39	<u>17,07</u> 13,65	<u>5,12</u> 4,15	<u>6,87</u> 5,72	<u>2,98</u> 2,46	<u>3,83</u> 3,28	<u>1,98</u> 1,68	<u>2,47</u> 2,16
127	200	—	—	—	—	—	—	—	—
	800	—	—	<u>14,70</u> 11,90	<u>17,73</u> 16,42	<u>8,55</u> 7,07	<u>10,99</u> 9,40	<u>5,69</u> 4,81	<u>7,09</u> 6,19
	1600	<u>17,22</u> 13,48	<u>24,50</u> 19,59	<u>7,36</u> 5,95	<u>9,87</u> 8,21	<u>4,28</u> 3,56	<u>5,50</u> 4,70	<u>2,85</u> 2,41	<u>3,55</u> 3,10

Таблица 1.5

Выделяемая удельная электрическая мощность, при прогреве бетона полосовыми электродами с односторонним размещением (толщина конструкции 30 см), кВт/м³.

Напряжение В	Среднее удельное сопротивление, Ом.см	Мощность, кВт/м ³							
		Расстояние между осями электродов, см							
		10		20		30		40	
		Ширина электродов, см							
		2	5	2	5	2	5	2	5
51	200	<u>13,8</u> 10,6	<u>19,1</u> 14,8	<u>6,22</u> 4,9	<u>8,3</u> 6,65	<u>3,79</u> 3,04	<u>4,92</u> 4,03	<u>2,62</u> 2,13	<u>3,34</u> 2,78
	800	<u>3,45</u> 2,65	<u>4,78</u> 3,7	<u>1,56</u> 1,23	<u>2,08</u> 1,66	—	—	—	—
	1600	<u>1,73</u> 1,33	<u>2,39</u> 1,85	—	—	—	—	—	—
60	200	<u>19,1</u> 14,62	<u>2,62</u> 20,2	<u>8,58</u> 6,76	<u>11,42</u> 9,17	<u>5,24</u> 4,2	<u>6,8</u> 5,56	<u>3,62</u> 2,94	<u>4,61</u> 3,84
	800	<u>4,77</u> 3,66	<u>6,6</u> 5,11	<u>2,15</u> 1,7	<u>2,87</u> 2,29	—	—	—	—
	1600	<u>2,39</u> 1,84	<u>3,30</u> 2,55	—	—	—	—	—	—
70	200	<u>26</u> 19,9	<u>35,91</u> 27,9	<u>11,68</u> 9,22	<u>15,6</u> 12,49	<u>7,12</u> 5,72	<u>9,25</u> 7,56	<u>4,92</u> 4,01	<u>6,27</u> 5,22
	800	<u>6,48</u> 4,98	<u>9</u> 6,95	<u>2,93</u> 2,32	<u>3,91</u> -	—	<u>2,31</u> 1,9	—	—
	1600	<u>3,25</u> 2,49	<u>4,5</u> 3,44	—	—	—	—	—	—
87	200	—	—	<u>18,12</u> 14,27	<u>24,17</u> 19,34	<u>11,02</u> 8,85	<u>14,29</u> 11,17	<u>7,63</u> 6,19	<u>9,72</u> 8,1
	800	<u>10,05</u> 7,72	<u>13,92</u> 10,74	<u>4,54</u> 3,58	<u>6,05</u> 4,83	<u>2,76</u> 2,21	<u>3,57</u> 2,94	—	<u>2,44</u> 2,02
	1600	<u>5,04</u> 3,87	<u>6,95</u> 5,38	<u>2,27</u> 1,79	<u>3,02</u> 2,41	—	—	—	—
106	200	—	—	<u>26,85</u> 21,19	<u>35,84</u> 28,73	<u>16,33</u> 13,1	<u>21,2</u> 17,4	<u>11,3</u> 9,2	<u>14,4</u> 11,98
	800	<u>14,96</u> 11,5	<u>20,6</u> 15,93	<u>6,65</u> 5,32	<u>8,98</u> 7,16	<u>4,1</u> 3,28	<u>5,32</u> 4,36	<u>2,84</u> 2,28	<u>3,62</u> 3,02
	1600	<u>7,48</u> 6,55	<u>10,3</u> 7,99	<u>3,37</u> 2,64	<u>4,49</u> 3,58	<u>2,05</u> 1,64	<u>2,66</u> 2,18	—	—
127	200	—	—	<u>38,55</u> 30,38	<u>51,5</u> 41,21	<u>23,48</u> 18,82	<u>30,43</u> 24,98	<u>16,24</u> 13,2	<u>20,62</u> 17,23
	800	<u>21,4</u> 16,43	<u>29,6</u> 22,94	<u>9,68</u> 7,56	<u>12,88</u> 10,2	<u>6,84</u> 4,82	<u>7,64</u> 6,25	<u>4,09</u> 3,28	<u>5,21</u> 4,34
	1600	<u>10,7</u> 8,22	<u>14,8</u> 11,47	<u>4,84</u> 3,78	<u>6,44</u> 5,25	<u>2,92</u> 2,36	<u>3,82</u> 3,12	<u>2,05</u> 1,64	<u>2,61</u> 2,17

Примечание. В числителе приведена мощность для трехфазного тока, в знаменателе — для однофазного.

Таблица 1.6

Выделяемая удельная электрическая мощность, при прогреве бетона полосовыми электродами с односторонним размещением (толщина конструкции 40 см), кВт/м³.

Напряжение В	Среднее удельное сопротивление, Ом.см	Мощность, кВт/м ³							
		Расстояние между осями электродов, см							
		10		20		30		40	
		Ширина электродов, см							
		2	5	2	5	2	5	2	5
51	200	<u>9,75</u> 7,44	<u>10,5</u> 10,21	<u>4,53</u> 3,52	<u>6</u> 4,79	<u>2,82</u> 2,22	<u>3,66</u> 2,92	<u>1,99</u> 1,58	<u>2,53</u> 2,06
	800	<u>2,44</u> 1,86	<u>2,68</u> 2,55	—	—	—	—	—	—
	1600	—	—	—	—	—	—	—	—
60	200	<u>13,44</u> 10,24	<u>14,5</u> 14,05	<u>6,25</u> 4,85	<u>8,27</u> 6,61	<u>3,89</u> 3,06	<u>5,05</u> 4,03	<u>2,74</u> 2,18	<u>3,49</u> 2,84
	800	<u>3,36</u> 2,56	<u>3,62</u> 3,51	—	<u>2,07</u> 1,65	—	—	—	—
	1600	—	—	—	—	—	—	—	—
70	200	<u>18,32</u> 14	<u>19,73</u> 19,18	<u>8,52</u> 6,61	<u>11,28</u> 9,02	<u>5,3</u> 4,17	<u>6,88</u> 5,48	<u>3,74</u> 2,97	<u>4,76</u> 3,88
	800	<u>4,57</u> 3,5	<u>4,93</u> 4,79	<u>2,13</u> 1,65	<u>2,82</u> 2,25	—	—	—	—
	1600	<u>2,29</u> 1,75	<u>2,46</u> 2,39	—	—	—	—	—	—
87	200	<u>28,39</u> 21,64	<u>30,28</u> 29,64	<u>13,18</u> 10,22	<u>17,48</u> 13,97	<u>8,2</u> 6,46	<u>10,62</u> 8,5	<u>5,81</u> 4,6	<u>7,36</u> 6
	800	<u>7,1</u> 5,4	<u>7,57</u> 7,4	<u>3,3</u> 2,56	<u>4,37</u> 3,51	<u>2,05</u> 1,62	<u>2,65</u> 2,13	—	—
	1600	<u>3,55</u> 2,72	<u>3,79</u> 3,7	—	<u>2,18</u> 1,75	—	—	—	—
106	200	—	—	<u>19,6</u> 15,21	<u>25,93</u> 20,71	<u>12,18</u> 9,6	<u>15,79</u> 12,61	<u>8,6</u> 6,83	<u>10,93</u> 8,91
	800	<u>10,5</u> 8	<u>11,31</u> 10,95	<u>4,75</u> 3,78	<u>6,3</u> 4,04	<u>3,05</u> 2,43	<u>3,95</u> 3,14	<u>2,15</u> 1,72	<u>2,75</u> 2,24
	1600	<u>5,25</u> 4	<u>5,55</u> 5,37	<u>2,45</u> 1,89	<u>3,22</u> 2,58	—	—	—	—
127	200	—	—	<u>28,1</u> 21,83	<u>37,2</u> 29,79	<u>17,5</u> 13,79	<u>22,9</u> 18,1	<u>12,13</u> 9,79	<u>15,17</u> 12,78
	800	<u>15,7</u> 11,51	<u>16,28</u> 15,8	<u>7,03</u> 5,46	<u>9,3</u> 7,45	<u>4,37</u> 3,45	<u>5,73</u> 4,52	<u>3,08</u> 2,48	<u>3,92</u> 3,2
	1600	<u>7,56</u> 5,76	<u>8,14</u> 7,9	<u>3,51</u> 2,73	<u>4,75</u> 3,73	<u>2,18</u> 1,73	<u>2,86</u> 2,26	—	—

Методика определения удельного электрического сопротивления бетона в строительной лаборатории.

Определение удельного электрического сопротивления бетона может производиться разными способами (наиболее простым и удобным является метод «амперметра-вольтметра»).

Бетонная смесь укладывается в форму размером 10х10х20 см, у которой боковые стенки и днище изготовлены из диэлектрика (пластмасса, пропитанное минеральным маслом дерево, текстолит и др.), а торцевые стенки, служащие электродами, из металла.

Образец включается в электрическую цепь, по которой пропускается ток строго фиксированного напряжения. Напряжение выбирается в зависимости от состава бетона и пределов измерения миллиамперметра (определяется оно опытным путем).

Подача и регулирование напряжения производится лабораторным автотрансформатором (ЛАТР). Сила тока в цепи измеряется миллиамперметром с точностью до 1мА, напряжение – вольтметром с точностью до 1В.

После определения всех электрических параметров расчет удельного сопротивления ведется по формуле:

$$\rho = (R \cdot S) / L,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление бетона, Ом·см;

R – электрическое сопротивление бетона, Ом;

S – площадь поперечного сечения образца, см²;

L – расстояние между электродами, см.

Расчет сопротивления образца R в зависимости от схемы включения последнего в электрическую цепь производится по различным формулам.

При включении образца в цепь по схеме (рис. 1) сопротивление его рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{U}{I} - R_a,$$

где R – сопротивление образца, Ом;

U – показания вольтметра, включенного в цепь последовательно, В;

I – показатели амперметра, А;

R_a – собственное сопротивление амперметра, включенного в цепь последовательно, Ом (указывается в паспорте прибора или на его циферблате).

Тогда удельное сопротивление бетона определяется по формуле:

$$\rho = \left(\frac{U}{I} - R_a \right) \cdot \frac{S}{L} = \frac{U \cdot S}{I \cdot L} - \frac{R_a \cdot S}{L}$$

При включении образца в цепь по схеме (рис.2) его сопротивление R рассчитывается по формуле $R = \frac{U}{I}$ при условии, что сопротивление вольтметра значительно выше сопротивления образца, т.е. $R_v > R$, где R_v – сопротивление вольтметра.

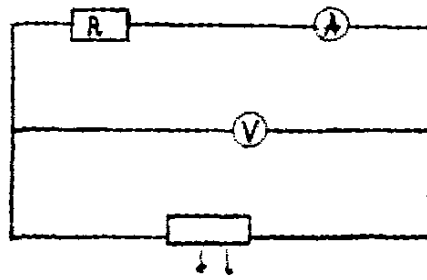


Рис. 1. Схема электрической цепи по определению удельного электрического сопротивления бетона при включении вольтметра параллельно образцу и амперметру

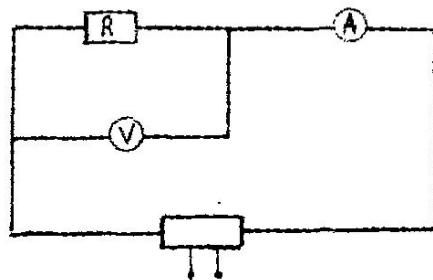


Рис. 2. Схема электрической цепи по определению удельного электрического сопротивления бетона при включении вольтметра параллельно образцу.

В противном случае (когда R_v соизмеримо с R) сопротивление образца определяется по формуле:

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}},$$

а удельное сопротивление:

$$\rho = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}} \cdot \frac{S}{L}$$

Для определения сопротивления бетона могут использоваться и другие способы, например, при отсутствии миллиамперметра - схема с двумя вольтметрами (рис. 3).

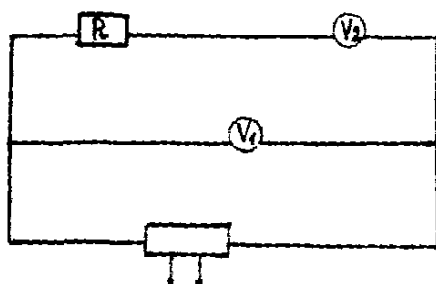


Рис. 3. Схема электрической цепи по определению удельного сопротивления бетона с двумя вольтметрами.

В этом случае сопротивление рассчитывается по формуле:

$$R = R_{v2} \frac{U_1 - U_2}{U_2}$$

где U_1 – показания вольтметра, включенного в цепь параллельно (V_1), В;

U_2 – показания вольтметра, включенного в цепь последовательно (V_2), В;

R – сопротивление образца, Ом;

R_{v2} – собственное сопротивление вольтметра, включенного в цепь последовательно, Ом (указывается в паспорте прибора или на его циферблате).

Тогда удельное сопротивление бетона определяется по формуле:

$$\rho = R_{v2} \frac{U_1 - U_2}{U_2} \cdot \frac{S}{L}$$

Примеры определения электрического сопротивления бетона.

1. *Определение удельного сопротивления при включении вольтметра параллельно образцу и амперметру.*

Проведенные замеры электротехнических параметров составили:

$$U = 20 \text{ В}, I = 80 \text{ мА}, S = 100 \text{ см. кв.}, L = 20 \text{ см}, R_a = 70 \text{ Ом.}$$

Определяем удельное сопротивление по формуле:

$$\rho = \left(\frac{U}{I} - R_a \right) \cdot \frac{S}{L} = \frac{U \cdot S}{I \cdot L} - \frac{R_a \cdot S}{L}$$

$$\text{Сопротивление равно: } R = \frac{20 \text{ В}}{0,08 \text{ А}} - 70 \text{ Ом} = 180 \text{ Ом}$$

$$\text{Удельное сопротивление составляет: } \rho = \frac{180 \text{ Ом} \cdot 100 \text{ см. кв.}}{20 \text{ см}} = 900 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

2. *Определение удельного сопротивления бетона в электрической цепи двумя вольтметрами.*

Проведенные замеры электротехнических параметров составили:

$$U_1 = 27 \text{ В}, U_2 = 20 \text{ В}, R_{v_2} = 500 \text{ Ом}, S = 100 \text{ см. кв.}, L = 20 \text{ см.}$$

Определяем удельное сопротивление по формуле:

$$\rho = R_{v_2} \cdot \frac{U_1 - U_2}{U_2} \cdot \frac{S}{L}$$

$$\text{Сопротивление равно: } R = 500 \cdot \frac{27,0 - 20}{20} = 1750 \text{ Ом}$$

$$\text{Удельное сопротивление составляет: } \rho = \frac{1750 \text{ Ом} \cdot 100 \text{ см.кв}}{20 \text{ см}} = 8750 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

Расчет темпа и продолжительности остывания поверхностного слоя конструкции

Для конструкции, заданной своими размерами, характеристиками бетона (вид цемента, его марка и расход, коэффициенты тепло- и температуропроводности, начальная температура) и утеплением, характеризующимся α - коэффициентом теплообмена, и остывающей при температуре наружного воздуха T_n , темп и продолжительность остывания до заданной конечной температуры T_k определяются в следующей последовательности.

1. Устанавливается условная начальная температура поверхности бетона T_{ynn} , учитывающая вид, марку и расход цемента, а также модуль поверхности конструкции и коэффициент теплопередачи ограждения:

$$T_{ynn} = K_r T_n A_i f_i(\mu_i), \quad ^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\text{где } K_r = 1,33 \exp \left[-K_u \frac{(\alpha M_n)^2}{M_u \rho} \right]; \quad (2)$$

K_u - коэффициент, учитывающий вид цемента: для бетонов на портландцементе $K_u = 0,72$, на шлакопортландцементе $K_u = 0,98$;

α - коэффициент теплопередачи ограждения (утепленной опалубки, укрытие и т.п.), Вт/м²·°C;

M_n - модуль поверхности конструкции, м⁻¹;

M_u - марка цемента;

ρ - расход цемента, кг/м³;

T_n - начальная температура бетона (в момент начала остывания);

A_i - параметр, определяемый по графику рис. 1, в зависимости от условий теплообмена, определяемых числом B_i и геометрическим характером конструкции;

$B_i = \alpha R_i \lambda^{-1}$, где λ - коэффициент теплопроводности бетона, Вт/м·°C, а R_i - обобщенный характерный размер конструкции, зависящий от ее геометрии и определяемый: для пластины $R_n = M_n^{-1}$; для цилиндра $R_u = 2M_n^{-1}$ и для шара $R_u = 3M_n^{-1}$. Пластиной считается конструкция, два измерения которой, значительно, - более чем в три раза, - превышают третье, например, стенка; цилиндром - конструкция, два измерения которой более чем в три раза меньше третьего, например, колонна; шаром - конструкция, все три измерения которой имеют величину одного порядка, например, массивный фундамент под оборудование и т.п.

$f_i(\mu_i)$ - функция, где параметр μ_i определяется по формуле:

$$\mu_i^2 = x(1 + yB_i^{-z})^{-1}, \quad (3)$$

в которой для пластины: $x = 2,47$; $y = 2,24$ и $z = 1,02$; для цилиндра: $x = 5,78$; $y = 2,45$ и $z = 1,04$; для шара: $x = 9,86$; $y = 2,70$ и $z = 1,07$, а сама $f_i(\mu_i) = \mu_i^{-1} \sin \mu_i$.

2. Исходя из известных условий теплообмена, заданных коэффициентом теплоотдачи α (т.е. числом B_i), коэффициентом теплопроводности бетона λ , обобщенным размером конструкции R_i и определенному по известному B_i параметру μ_i , определяется темп охлаждения m :

$$m = \mu_i^2 a R_i^{-2}, \quad (4)$$

где a - коэффициент температуропроводности бетона, м²/ч.

3. Продолжительность остывания поверхности (от условной начальной температуры T_{yup} до конечной T_k) $\tau_{ост}$ по найденному темпу охлаждения и известной температуре наружного воздуха $T_{нв}$ определяется по формуле:

$$\tau_{ост} = \frac{1}{m} \ln \frac{T_{yup} - T_{нв}}{T_k - T_{нв}}, \quad (5)$$

4. Средняя температура поверхности за время остывания $T_{n,ср}$ составит:

$$T_{n,ср} = \frac{T_{yup}}{m \cdot \tau_{ост}} [1 - \exp(-m \cdot \tau_{ост})], \quad ^\circ\text{C} \quad (6)$$

5. По найденной продолжительности остывания $\tau_{ост}$ и средней за период остывания температуры поверхности $T_{n,ср}$ по графику рис. 1 определяется относительная прочность бетона, набранная им к моменту достижения T_k .

Пример расчета темпа и продолжительности остывания конструкции

Задача. Требуется рассчитать продолжительность остывания до $T_k = 0^\circ\text{C}$ и определить набранную к этому моменту относительную прочность бетона протяженной стенки толщиной 0,6 м при следующих условиях: температура бетона, уложенного в конструкцию $T_u = 50^\circ\text{C}$; температура наружного воздуха $T_{нв} = -10^\circ\text{C}$; бетон М300 приготовлен на портландцементе марки 400 при расходе 300 кг/м³; коэффициент теплопроводности бетона $\lambda = 1,3 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$; температуропроводности $a = 22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$; коэффициент теплообмена ограждения $\alpha = 5 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$.

Решение. Для заданных условий $M_{л} = 2/0,6 = 3,3 \text{ м}^{-1}$; $R_i = 1/3,3 = 0,3 \text{ м}$; $B_i = 5 \cdot 0,3 \cdot 1,3^{-1} = 1,15$; $A_i = 1,13$ (по графику рис. 1 для пластины при $B_i = 1,15$); $\mu_i^2 = 2,47(1 + 2,24 \cdot 1,15^{-1,02})^{-1} = 0,84$ (по формуле 3); $\mu_i = 0,92$

1. Коэффициент экзотермии K_τ в соответствии с (2):

$$K_\tau = 1,33 \exp \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 3,3)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,33$$

2. Условная начальная температура поверхности T_{yup} по (1):

$$T_{yup} = 1,33 \cdot 50 \cdot 1,13 \cdot \cos 0,92 = 45,5 \quad ^\circ\text{C}$$

3. Темп охлаждения m определяется по (4):

$$m = 0,84 \cdot 22 \cdot 10^{-4} (0,3)^{-2} = 0,0205 \quad \text{ч}^{-1}$$

4. Продолжительность остывания $\tau_{ост}$ до 0°C определяется по (5):

$$\tau_{ост} = \frac{1}{0,0205} \ln \frac{45,5 - (-10)}{0 - (-10)} = 83,6 \quad \text{ч}$$

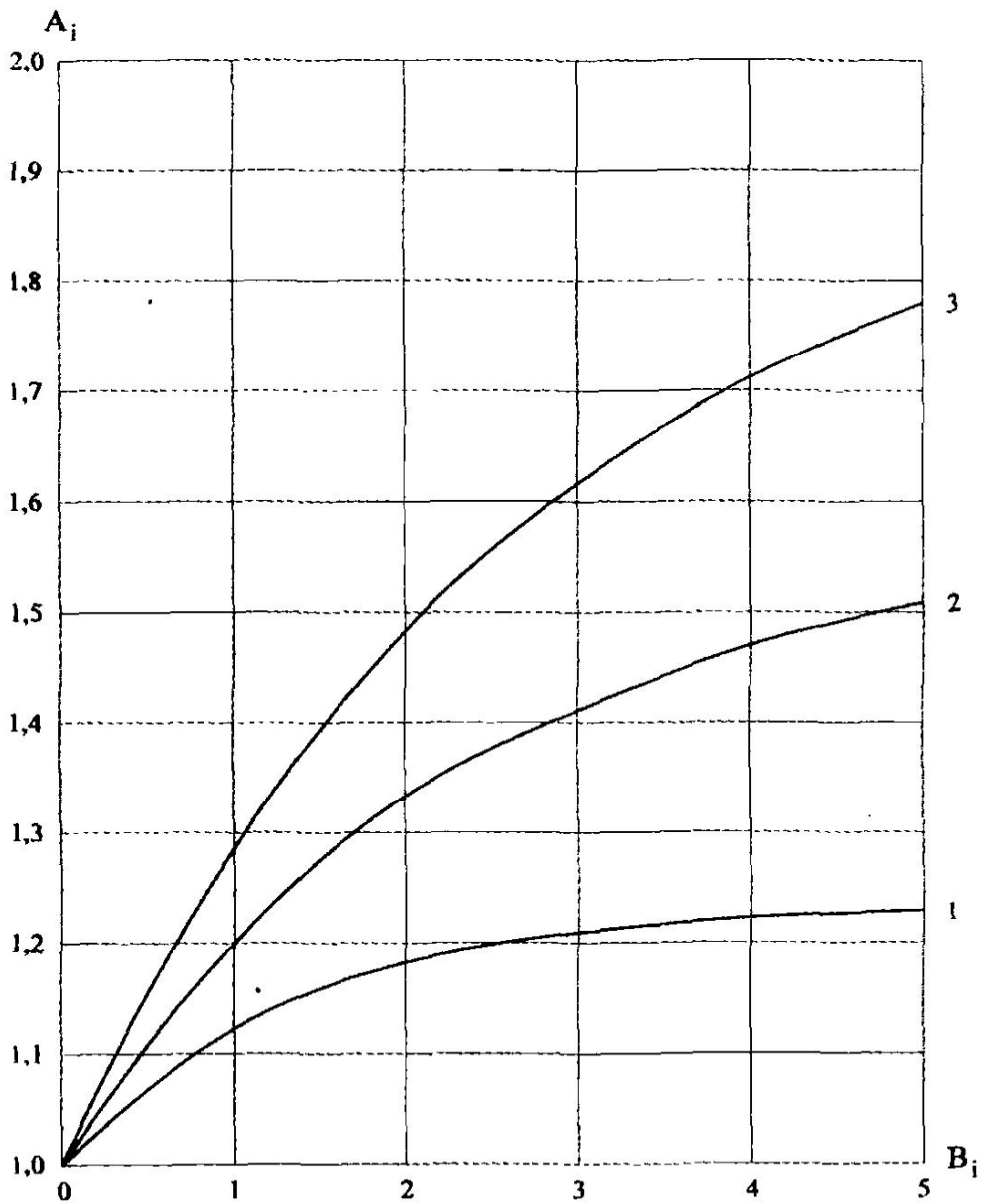


Рис. 1 График зависимости $A_i = f(B_i)$.
 1, 2 и 3 - соответственно для пластины цилиндра и шара.

Определение температуры и продолжительности остывания конструкций.

Предлагаемая ниже методика позволяет определять температуру в любой точке остывающей конструкции, продолжительность остывания этой точки до заданной температуры и среднюю температуру точки за период остывания – применительно к конструкциям трех типов:

- типа «неограниченной пластины» - стены, плиты, перекрытия и т.п.;
- типа «протяженного прямоугольного бруса» - высокие колонны, длинные балки, ригели, высокие простенки и т.п.;
- типа «прямоугольного параллелепипеда» - короткие колонны, балки, простенки, фундаменты прямоугольного сечения и т.п.

Расчет температуры и продолжительности остывания конструкций типа «неограниченная пластина»

Для конструкций типа «неограниченная пластина», т.е. пластина, два измерения которой Z и Y значительно превышают третье – X (рис. 1а) и заданной своими размерами – толщиной 2R, характеристиками бетона (вид цемента, его марка и расход Ц, коэффициенты тепло- и температуропроводности (λ и a), начальная температура T_H) и утеплением, характеризующимся α -коэффициентом теплообмена и остывающей при температуре наружного воздуха $T_{НВ}$, температура в точке X и в момент времени τ после начала остывания $T_{x,\tau}$ определяется по следующей формуле:

$$T_{x,\tau} - T_{НВ} = (T_H - T_{НВ}) A \cos \mu \frac{x}{R} \exp(-m\tau), \quad (1)$$

или если обозначить избыточные температуры:

$$T_{x,\tau} - T_{НВ} = \theta_{x,\tau} \quad \text{и} \quad T_H - T_{НВ} = \theta_H; \quad (2)$$

$$\theta_{x,\tau} = \theta_H A \cos \mu \frac{x}{R} \exp(-m\tau). \quad (3)$$

Избыточная температура поверхности $\theta_{R,\tau}$ ($x=R$) и центра $\theta_{0,\tau}$ ($x=0$) определяются соответственно;

$$\theta_{R,\tau} = \theta_H A \cos \mu \exp(-m\tau); \quad (4)$$

$$\theta_{0,\tau} = \theta_H A \exp(-m\tau). \quad (5)$$

В формулах (1) – (5) параметр μ определяется:

$$\mu^2 = 2,5(1 + 2,25Bi^{-1})^{-1}, \quad (6)$$

где Bi – критерий Био, $Bi = \alpha R \lambda^{-1}$, где R = половина толщины конструкции, λ – коэффициент теплопроводности бетона, Вт/м²С; A – параметр, определяемый по формуле:

$$A = \frac{2 \sin \mu}{\mu + \sin \mu \cos \mu}. \quad (7)$$

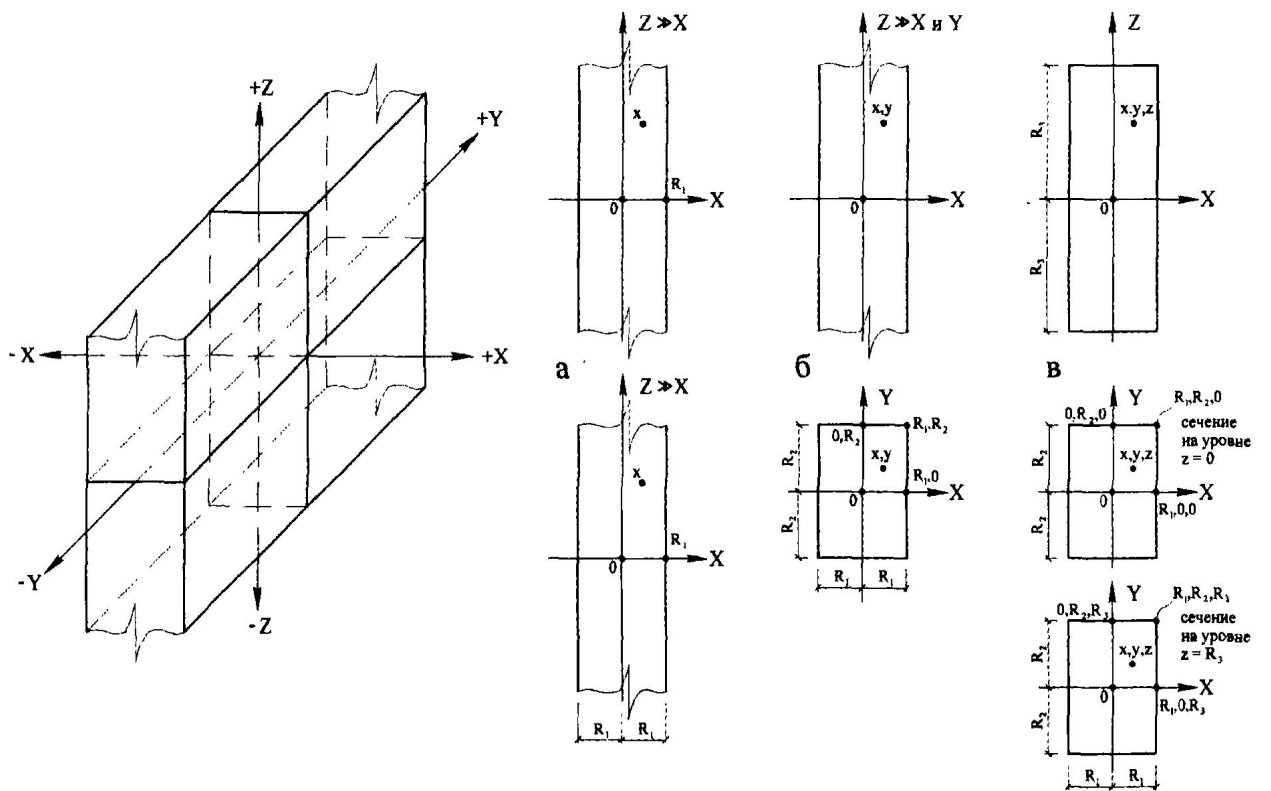


Рис.1. Типы конструкций: а - неограниченная пластина; б - протяженный брус; в - параллелепипед.
 Верхний ряд а, б и в - сечения на уровне $z=0$; нижний ряд - на уровне $z=0$ и $z=R_3$.

Определение продолжительности остывания производится в следующей последовательности:

1. Устанавливается условная избыточная начальная (т.е. в момент времени $\tau = 0$) температура поверхности $\theta_{унп}$ и центра $\theta_{унц}$:

$$\theta_{унп} = K_{\tau} \theta_H A \cos \mu ; \quad (8)$$

$$\theta_{унц} = K_{\tau} \theta_H A . \quad (9)$$

где K_{τ} – коэффициент экзотермии, определяемый выражением:

$$K_{\tau} = 1,33 \exp(-K_{ц} \frac{(\alpha \cdot M_{п})^2}{M_{ц} \cdot Ц}), \quad (10)$$

где $K_{ц}$ – коэффициент, учитывающий вид цемента: для бетонов на портландцементе $K_{ц} = 0,72$, на шлакопортландцементе $K_{ц} = 0,98$;

$M_{п}$ – модуль поверхности конструкций, m^{-1} ;

$M_{ц}$ – марка цемента;

$Ц$ – расход цемента, $кг/м^3$.

2. Исходя из известных условий теплообмена, заданных коэффициентом α , и найденному выше значению μ , определяется темп остывания m :

$$m = \mu^2 \frac{a}{R^2}, ч^{-1} \quad (11)$$

где a – коэффициент температуропроводности бетона, $м^2/ч$.

3. Продолжительность остывания поверхности $\tau_{охл.п}$ от условной избыточной начальной температуры поверхности $\theta_{унп}$ до заданной конечной θ_K определяется по формуле:

$$\tau_{охл.п} = \frac{1}{m} \ln \frac{\theta_{унп}}{\theta_K} = \frac{\ln \theta_{унп} - \ln \theta_K}{m} . \quad (12)$$

Продолжительность остывания центра $\tau_{охл.ц}$ от условной избыточной начальной температуры центра $\theta_{унц}$ до заданной конечной θ_K определяется по формуле:

$$\tau_{охл.ц} = \frac{1}{m} \ln \frac{\theta_{унц}}{\theta_K} = \frac{\ln \theta_{унц} - \ln \theta_K}{m} . \quad (13)$$

4. Средняя избыточная температура поверхности за время остывания $\theta_{п.ср}$ составит:

$$\theta_{п.ср} = \frac{\theta_{унп}}{m \cdot \tau_{охл.п}} [1 - \exp(-m \cdot \tau_{охл.п})] . \quad (14)$$

Средняя избыточная температура центра за время остывания $\theta_{ц.ср}$ составит:

$$\theta_{ц.ср} = \frac{\theta_{унц}}{m \cdot \tau_{охл.ц}} [1 - \exp(-m \tau_{охл.ц})] \quad (15)$$

5. По найденной продолжительности остывания $\tau_{\text{охл.п}}$ и $\tau_{\text{охл.ц}}$ и средней за период остывания температуре поверхности $T_{\text{п.ср}}$ и средней за период остывания температуре центра $T_{\text{ц.ср}}$:

$$T_{\text{п.ср}} = \theta_{\text{п.ср}} + T_{\text{нв}} \quad (16)$$

$$T_{\text{ц.ср}} = \theta_{\text{ц.ср}} + T_{\text{нв}} \quad (17)$$

По графикам (рис. 2), определяется относительная прочность бетона в поверхностных и центральных зонах, набранная им к моменту достижения температуры $T_{\text{к}}$.

Пример расчета остывания конструкции типа «неограниченная пластина».

Задача. Требуется рассчитать продолжительность остывания до $T_{\text{к}} = 0^{\circ}\text{C}$ и набранную к этому моменту относительную прочность бетона в поверхностных и центральных слоях протяженной стенки толщиной $2R = 0,4$ м при следующих условиях: температура бетона, уложенного в конструкцию $T_{\text{н}} = 80^{\circ}\text{C}$; температура наружного воздуха $T_{\text{нв}} = -10^{\circ}\text{C}$; бетон М300 приготовлен на портландцементе марки 400 при расходе 300 кг/м^3 ; коэффициент теплопроводности бетона $\lambda = 1,3 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$, температуропроводность $a = 22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$; коэффициент теплообмена ограждения $\alpha = 5 \text{ Вт/м}^2\text{C}$.

Решение.

1. Избыточные температуры по (2):

$$\theta_{\text{н}} = T_{\text{н}} - T_{\text{нв}} = 80 - (-10) = 90^{\circ}\text{C};$$

$$\theta_{\text{к}} = T_{\text{к}} - T_{\text{нв}} = 0 - (-10) = 10^{\circ}\text{C}.$$

2. Модуль поверхности конструкции $M_{\text{п}}$:

$$M_{\text{п}} = \frac{2M^2}{0,4M^3} = 5,0\text{м}^{-1}.$$

3. Число Bi для заданных условий (расшифровка к (6)):

$$Bi = \alpha R \lambda^{-1} = 5 \cdot 0,2 \cdot 1,3^{-1} = 0,77.$$

4. Параметр μ в соответствии с (6):

$$\mu^2 = 2,5(1 + 2,25Bi^{-1}) = 2,5(1 + 2,25 \cdot 0,77^{-1}) = 0,63;$$

$$\mu = 0,79$$

5. Параметр A в соответствии с (7):

$$A = \frac{2 \sin \mu}{\mu + \sin \mu \cos \mu} = \frac{2 \sin 0,79}{0,79 + \sin 0,79 \cdot \cos 0,79} = 1,08$$

6. Коэффициент экзотермии $K_{\text{т}}$ в соответствии с (10):

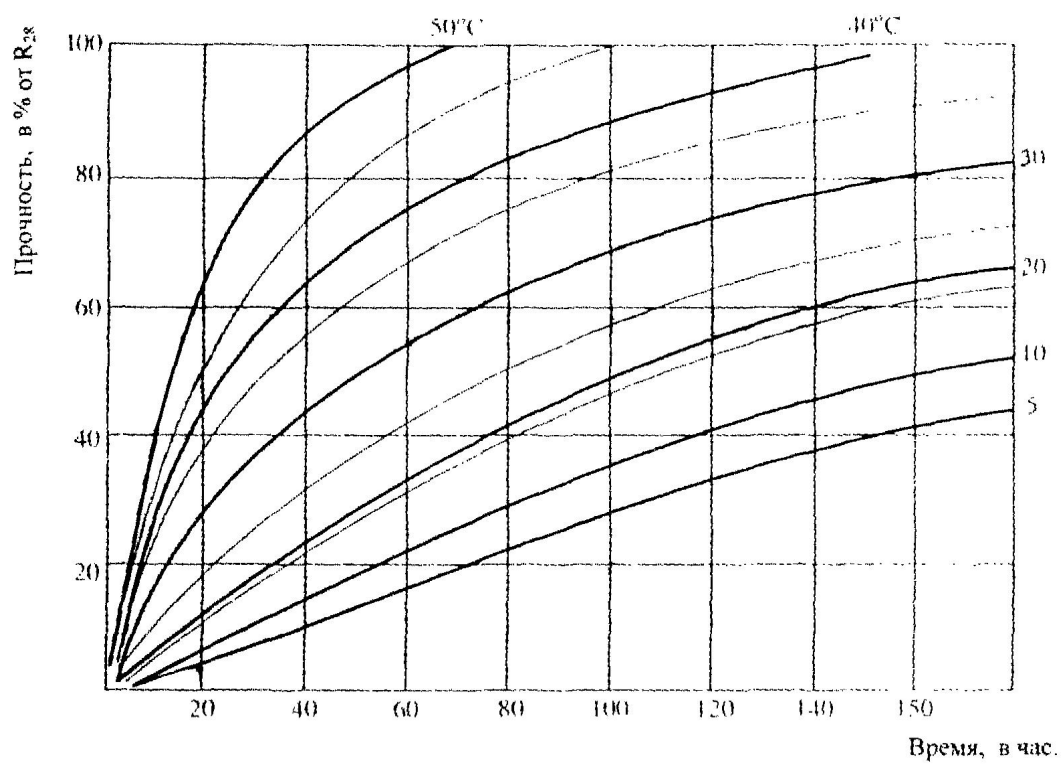


Рис. 2. Нарастание прочности бетона на портландцементе при положительных температурах.

$$K_r = 1,33 \exp \left[-0,72 \frac{(\alpha \cdot M_{II})^2}{C \cdot M_{II}} \right] = 1,33 \exp \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 5,0)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,32$$

7. Избыточная условная начальная температура поверхности $\theta_{УНП}$ по (8):
 $\theta_{УНП} = K_r \theta_H A \cos \mu = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,08 \cdot \cos 0,79 = 90,3^\circ \text{C}$.

8. Темп остывания m определяется по (11):

$$m = \mu^2 \frac{a}{R^2} = 0,63 \frac{22 \cdot 10^{-4}}{0,2^2} = 0,0346 \text{ ч}^{-1}.$$

9. Продолжительность остывания поверхности $\tau_{охл.п}$ до температуры θ_k определяется по (12):

$$\tau_{охл.п} = \frac{\ln \theta_{УНП} - \ln \theta_k}{m} = \frac{\ln 90,3 - \ln 10}{0,0346} = 63,6 \text{ ч.}$$

Продолжительность остывания центра $\tau_{охл.ц}$ до температуры θ_k определяется по (13):

$$\tau_{охл.ц} = \frac{\ln \theta_{УНЦ} - \ln \theta_k}{m} = \frac{\ln 128,3 - \ln 10}{0,0346} = 73,8 \text{ ч.}$$

10. Средняя температура поверхности $T_{п.ср}$ за время остывания определяется по (14) и (16):

$$\theta_{п.ср} = \frac{\theta_{УНП}}{m \cdot \tau_{охл.п}} [1 - \exp(-m \cdot \tau_{охл.п})] = \frac{90,3}{0,0346 \cdot 63,6} [1 - \exp(-0,0346 \cdot 63,6)] = 36,5^\circ \text{C}$$

$$T_{п.ср} = \theta_{п.ср} + T_{НВ} = 36,5 + (-10) = 26,5^\circ \text{C}.$$

Средняя температура центра $T_{ср.ц}$ за время остывания определяется по (15) и (17):

$$\theta_{ср.ц} = \frac{\theta_{УНЦ}}{m \cdot \tau_{охл.ц}} [1 - \exp(-m \cdot \tau_{охл.ц})] = \frac{128,3}{0,0346 \cdot 73,8} [1 - \exp(-0,0346 \cdot 73,8)] = 46,3^\circ \text{C}$$

$$T_{ср.ц} = \theta_{ср.ц} + T_{НВ} = 46,3 + (-10) = 36,3^\circ \text{C}.$$

11. Согласно графикам (рис. 2), бетон М300 при температуре $26,5^\circ \text{C}$ за время 63,6 ч приобретает относительную прочность порядка 55% (- прочность бетона поверхностных зон); при температуре $36,3^\circ \text{C}$ за время 73,8 ч – около 75% (- прочность центральных зон).

12. При расчете термосного остывания по методике Б.Г. Скрамтаева имеют место следующие результаты:

- средняя температура бетона (всего!) за период остывания $t_{б.ср}$:

$$t_{б.ср} = \frac{T_{п.ср} - T_k}{1,03 + 0,181 M_{II} + 0,006(T_{п.ср} - T_k)} = \frac{80 - 0}{1,03 + 0,181 \cdot 5 + 0,006(80 - 0)} = 33,1^\circ \text{C}$$

- продолжительность остывания бетона (всего!) от $T_H = 80$ до 0°C τ :

$$\tau = \frac{1,05 \cdot 2400(T_H - T_K) + \alpha z}{3,6 \cdot \alpha \cdot M_{II}(t_{6,ср} - T_{НВ})} = \frac{1,05 \cdot 2400(80 - 0) + 300 \cdot 165}{3,6 \cdot 5 \cdot 5(33,1 - (-10))} = 64,7 \text{ ч.}$$

Остывая в течение 64,7 ч при средней температуре $33,1^\circ\text{C}$ бетон (согласно рис. 2), наберет прочность порядка 65%.

13. Если из каких либо технологических соображений требуется определить температуру поверхности и центра, например, на 24-м часу после начала остывания, то с использованием (12) – (13) и (16) – (17) находятся:

$$\theta_{n,\tau=24} = 90,3 \exp(-0,0346 \cdot 24) = 39,4^\circ\text{C}; \quad T_{n,\tau=24} = 39,4 + (-10) = 29,4^\circ\text{C}$$

$$\theta_{ц,\tau=24} = 128,3 \exp(-0,0346 \cdot 24) = 55,9^\circ\text{C}; \quad T_{ц,\tau=24} = 55,9 + (-10) = 45,9^\circ\text{C}$$

Расчет температуры и продолжительности остывания конструкций типа «протяженного прямоугольного бруса»

Под типом «протяженного прямоугольного бруса» понимаются конструкции, одно из измерений которой – Z (высота, длина) значительно больше каждого из двух других измерений X и Y (рис.16), а X и Y имеют один порядок.

С геометрической точки зрения протяженный прямоугольный брус сечением $2R_1 \cdot 2R_2$ рассматривается как результат пересечения под прямым углом двух неограниченных пластин: пластины толщиной $2R_1$ и пластины толщиной $2R_2$.

С теплофизической точки зрения температурное поле протяженного бруса определяется как произведение температурных коэффициентов (температурный коэффициент = $A \cos \mu \frac{x}{R} \exp(-m\tau)$) составляющих этот брус пластин, соответственно для точки с заданными координатами.

Так как условия теплообмена, определяемые $Bi = \alpha R \lambda^{-1}$, у соседних граней будут различными (если $R_1 \neq R_2$), различной будет и продолжительность остывания каждой грани до заданной температуры.

Для конструкции типа «протяженного прямоугольного бруса», заданной своими размерами сечения $2R_1 \cdot 2R_2$, характеристиками бетона (вид цемента, его марка и расход ρ , коэффициенты тепло- и температуропроводности (λ и a), начальная температура T_H) и утеплением, характеризующимся α – коэффициентом теплообмена и остывающей при температуре наружного воздуха $T_{НВ}$, температура в точке X, Y и в момент времени τ после начала остывания $T_{x,y,\tau}$ определяется по следующей формуле:

$$T_{x,y,\tau} - T_{НВ} = (T_H - T_{НВ}) A_{R_1} A_{R_2} \cos \mu_{R_1} \frac{x}{R_1} \cos \mu_{R_2} \frac{y}{R_2} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} \right) a \tau \right] \quad (18)$$

или если обозначить избыточные температуры:

$$T_{x,y,\tau} - T_{НВ} = \theta_{x,y,\tau}; \quad T_H - T_{НВ} = \theta_H; \quad (19)$$

$$\theta_{x,y,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} \cos \mu_{R_1} \frac{x}{R_1} \cos \mu_{R_2} \frac{y}{R_2} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} \right) a \tau \right] \quad (20)$$

где параметры A_{R_i} и μ_{R_i} – принимаются каждый для «своей» пластины.

Избыточная температура поверхности R_1 ($x = R_1, y = 0$) - $\theta_{R_1,\tau}$, избыточная температура поверхности R_2 ($x = 0, y = R_2$) - $\theta_{R_2,\tau}$, избыточная температура угла ($x = R_1, y = R_2$) - $\theta_{R_1,R_2,\tau}$ и избыточная температура центра сечения ($x = 0, y = 0$) - $\theta_{цт}$ определяются с учетом (20), соответственно:

$$\theta_{R_1,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} \cos \mu_{R_1} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} \right) a \tau \right], \quad (21)$$

$$\theta_{R_2,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} \cos \mu_{R_2} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} \right) a \tau \right], \quad (22)$$

$$\theta_{R_1,R_2,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} \cos \mu_{R_1} \cos \mu_{R_2} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} \right) a \tau \right], \quad (23)$$

$$\theta_{цт} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} \right) a \tau \right] \quad (24)$$

В соответствии с методикой расчета параметров для «неограниченной пластины» для каждой из пластин $2R_1$ и $2R_2$ находятся: число Bi_R , параметры μ_R и A_R , модуль поверхности $M_{ПР}$, коэффициент экзотермии $K_{\tau R}$, общие для бруса избыточные температуры θ_H и θ_K и темп остывания m .

Темп остывания определяется выражением:

$$m = \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} \right) a. \quad (25)$$

Далее для поверхности $X = R_1$, поверхности $Y = R_2$, угла и центра определяются:

- избыточные условные начальные температуры θ_{YHRi} :

$$\theta_{YHRi} = k_{\tau} \theta_H A_1 A_2 \cos \mu_{Ri}, \quad (26)$$

- продолжительность остывания τ_{Ri} до температуры θ_K :

$$\tau_{Ri} = \frac{\ln \theta_{YHRi} - \ln \theta_K}{m}, \quad (27)$$

- средняя избыточная температура $\theta_{cp,Ri}$ за время остывания:

$$\theta_{cp,Ri} = \frac{\theta_{YHRi}}{m \cdot \tau_{Ri}} [1 - \exp(-m \tau_{Ri})] \quad (28)$$

**Пример расчета остывания конструкции
типа «протяженного прямоугольного бруса»**

Задача. Рассчитать продолжительность остывания до температуры $T_k = 0^\circ\text{C}$ поверхностей, угла и центра простенка сечением $0,4 \cdot 0,8$ м, образованного пересечением двух пластин толщиной $2R_1 = 0,8$ м и $2R_2 = 0,4$ м при следующих условиях: температура бетона, уложенного в конструкцию $T_n = 80^\circ\text{C}$; температура наружного воздуха $T_{нв} = -10^\circ\text{C}$; коэффициент теплопроводности бетона $\lambda = 1,3$ Вт/м $^\circ\text{C}$, температуропроводности $a = 22 \cdot 10^{-4}$ м 2 /ч; коэффициент теплообмена $\alpha = 5$ Вт/м 2 $^\circ\text{C}$; бетон М300 приготовлен на портландцементе марки 400 при расходе 300 кг/м 3 .

Решение.

1. Для заданных условий применительно к пластине $2R_1 = 0,8$ м:

$$M_{п1} = \frac{2M^2}{0,8M^3} = 2,5M^{-1}; \quad Bi_{R_1} = \alpha\lambda^{-1}R = 5 \cdot 1,3^{-1} \cdot 0,4 = 1,54.$$

$$\mu_{R_1}^2 = 2,5(1 + 2,25Bi^{-1})^{-1} = 2,5(1 + 2,25 \cdot 1,54^{-1})^{-1} = 1,01; \quad \mu_{R_1} = 1,0$$

$$A_{R_1} = \frac{2 \sin \mu_{R_1}}{\mu_{R_1} + \sin \mu_{R_1} \cos \mu_{R_1}} = \frac{2 \sin 1,0}{1,0 + \sin 1,0 \cdot \cos 1,0} = 1,15$$

$$K_{\tau_{R_1}} = 1,33 \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 2,5)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,32$$

2. Для заданных условий применительно к пластине $2R_2 = 0,4$ м:

$$M_{п2} = \frac{2M^2}{0,4M^3} = 5M^{-1}; \quad Bi_{R_2} = \alpha\lambda^{-1}R = 5 \cdot 1,3^{-1} \cdot 0,2 = 0,77$$

$$\mu_{R_2}^2 = 2,5(1 + 2,25 \cdot 0,77^{-1})^{-1} = 0,63; \quad \mu_{R_2} = 0,79$$

$$A_{R_2} = \frac{2 \sin 0,79}{0,79 + \sin 0,79 \cos 0,79} = 1,08$$

$$K_{\tau_{R_2}} = 1,33 \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 5)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,32$$

3. Для обеих пластин:

$$\theta_n = 80 - (-10) = 90^\circ\text{C}; \quad \theta_k = 0 - (-10) = 10^\circ\text{C}$$

темп остывания m в соответствии с (25):

$$m = \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} \right) a = \left(\frac{1,0^2}{0,4^2} + \frac{0,79^2}{0,2^2} \right) 22 \cdot 10^{-4} = 0,048.$$

4. Условная избыточная начальная температура по (26):

$$\theta_{yHR_1} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot \cos 1,0 = 79,7^\circ\text{C};$$

$$\theta_{yHR_2} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot \cos 0,79 = 104^\circ\text{C};$$

$$\theta_{y_{HR,R_2}} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot \cos 1,0 \cdot \cos 0,79 = 56,2^\circ \text{C};$$

$$\theta_{y_{HЦ}} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 = 147,6^\circ \text{C}.$$

5. Продолжительности остывания τ_{R_i} до θ_k определяются по (27):

$$\tau_{R_1} = \frac{\ln 79,7 - \ln 10}{0,048} = 43,6 \text{ ч};$$

$$\tau_{R_2} = \frac{\ln 104 - \ln 10}{0,048} = 48,8 \text{ ч};$$

$$\tau_{R_1,R_2} = \frac{\ln 56,2 - \ln 10}{0,048} = 36 \text{ ч};$$

$$\tau_{\text{ц}} = \frac{\ln 147,6 - \ln 10}{0,048} = 56,1 \text{ ч}.$$

6. Средние избыточные температуры $\theta_{\text{ср},R_i}$ за время остывания определяются по (28):

$$\theta_{\text{ср},R_1} = \frac{79,7}{0,048 \cdot 43,6} [1 - \exp(-0,048 \cdot 43,6)] = 33,6^\circ \text{C}$$

$$\theta_{\text{ср},R_2} = \frac{104}{0,048 \cdot 48,8} [1 - \exp(-0,048 \cdot 48,8)] = 40^\circ \text{C}$$

$$\theta_{\text{ср},R_1,R_2} = \frac{56,2}{0,048 \cdot 36} [1 - \exp(-0,048 \cdot 36)] = 26,7^\circ \text{C}$$

$$\theta_{\text{ср},\text{ц}} = \frac{147,6}{0,048 \cdot 56,1} [1 - \exp(-0,048 \cdot 56,1)] = 51,1^\circ \text{C}$$

7. Средние температуры T_{R_i} составят:

$$T_{\text{ср},R_1} = \theta_{\text{ср},R_1} + T_{\text{НВ}} = 33,6 + (-10) = 23,6^\circ \text{C};$$

$$T_{\text{ср},R_2} = \theta_{\text{ср},R_2} + T_{\text{НВ}} = 40 + (-10) = 30^\circ \text{C};$$

$$T_{\text{ср},R_1,R_2} = \theta_{\text{ср},R_1,R_2} + T_{\text{НВ}} = 26,7 + (-10) = 16,7^\circ \text{C};$$

$$T_{\text{ср},\text{ц}} = \theta_{\text{ср},\text{ц}} + T_{\text{НВ}} = 51,1 + (-10) = 41,1^\circ \text{C}.$$

8. Таким образом, бетон на поверхности $x = R_1$ остывает до 0°C за 43,6 ч имея среднюю температуру $23,6^\circ \text{C}$ и набирает около 50% марочной прочности; бетон на поверхности $Y = R_2$ остывает за 48,8 ч при средней температуре 30°C и набирает около 55% марочной прочности; бетон в углу остывает до 0°C за 36 ч имея среднюю температуру $16,7^\circ \text{C}$ и набирает около 25% марочной прочности; и, наконец, бетон в центре простенка остывает до 0°C за 56,1 ч при средней температуре $41,1^\circ \text{C}$ и набирает более 65% от R_{28} .

9. При расчете термосного остывания по методике Б.Г. Скрамтаева имеют место следующие результаты:

- средняя температура бетона (всего!) за период остывания $t_{\text{б,ср}}$:

$$t_{б.ср} = \frac{T_H - T_K}{1,03 + 0,181M_{II} + 0,006(T_H - T_K)} = \frac{80 - 0}{1,03 + 0,181 \cdot 7,5 + 0,006(80 - 0)} = 27,9^\circ C$$

- продолжительность остывания бетона (всего!) от $T_H = 80^\circ C$ до $T_K = 0^\circ C$
 τ составляет:

$$\tau = \frac{1,05 \cdot 2400(T_H - T_K) + ЦЭ}{3,6 \cdot \alpha \cdot M_{II}(t_{б.ср} - T_{НВ})} = \frac{1,05 \cdot 2400 \cdot 80 + 300 \cdot 165}{3,6 \cdot 5 \cdot 7,5(27,9 - (-10))} = 49 \text{ ч.}$$

Остывая в течение 49 часов при средней температуре $27,9^\circ C$ бетон (согласно рис. 2), набирает прочность порядка 50% от R_{28} .

Расчет температуры и продолжительности остывания конструкции типа «прямоугольный параллелепипед»

Под типом «прямоугольного параллелепипеда» понимаются конструкции, все три измерения которых X , Y и Z имеют величину одного порядка (рис. 1в).

С геометрической точки зрения прямоугольный параллелепипед $2R_1 \cdot 2R_2 \cdot 2R_3$ рассматривается как результат пересечения под прямым углом трех неограниченных пластин толщиной соответственно $2R_1$, $2R_2$ и $2R_3$.

С теплофизической точки зрения температурное поле параллелепипеда определяется как произведение температурных коэффициентов (температурный коэффициент = $A \cos \mu \frac{x}{R} \exp(-m\tau)$) составляющих этот параллелепипед пластин, соответственно для точек, заданных своими координатами.

Так как условия теплообмена, определяемые $Bi = \alpha R \lambda^{-1}$, у соседних граней будут различными (если $R_1 \neq R_2 \neq R_3$), различной будет и продолжительность остывания каждой грани до заданной температуры.

Для конструкции типа «прямоугольный параллелепипед», заданной своими размерами $2R_1 \cdot 2R_2 \cdot 2R_3$, характеристиками бетона (вид цемента, его марка и расход Ц, коэффициенты тепло- и теплопроводности (λ и a), начальная температура T_H) и утеплением, характеризующимся α - коэффициентом теплообмена и остывающей при температуре наружного воздуха $T_{НВ}$, температура в точке X , Y , Z в момент времени τ после начала остывания $T_{x,y,z,\tau}$ определяется по следующей формуле:

$$T_{x,y,z,\tau} - T_{НВ} = (T_H - T_{НВ}) A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_1} \frac{x}{R_1} \cos \mu_{R_2} \frac{y}{R_2} \cos \mu_{R_3} \frac{z}{R_3} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a \tau \right] \quad (29)$$

или обозначив избыточные температуры:

$$T_{x,y,z,\tau} - T_{HB} = \theta_{x,y,z,\tau}; \quad T_H - T_{HB} = \theta_H; \quad (30)$$

$$\theta_{x,y,z,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_1} \frac{x}{R_1} \cos \mu_{R_2} \frac{y}{R_2} \cos \mu_{R_3} \frac{z}{R_3} \cdot \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a\tau \right] \quad (31)$$

где параметры A_{R_i} и μ_{R_i} – принимаются каждый для «своей» пластины.

Избыточные температуры точек среднего по высоте параллелепипеда сечения: поверхности R_1 ($x = R_1, y = 0, z = 0$) - $\theta_{R_1,\tau}$, поверхности R_2 ($x = 0, y = R_2, z = 0$) - $\theta_{R_2,\tau}$, угла ($x = R_1, y = R_2, z = 0$) - $\theta_{R_1R_2,\tau}$ и центра сечения ($x = 0, y = 0, z = 0$) - $\theta_{цс}$, а так же точек, например, верхней грани параллелепипеда: поверхности R_{1z} ($x = R_1, y = 0, z = R_3$) - $\theta_{R_1z,\tau}$, поверхности R_{2z} ($x = 0, y = R_2, z = R_3$) - $\theta_{R_2z,\tau}$, угла ($x = R_1, y = R_2, z = R_3$) - $\theta_{R_1R_2R_3}$ и центра сечения ($x = 0, y = 0, z = R_3$) - $\theta_{цс}$, определяются с учетом (31) соответственно:

$$\theta_{R_1,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_1} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a\tau \right]; \quad (32)$$

$$\theta_{R_2,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_2} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a\tau \right]; \quad (33)$$

$$\theta_{R_1R_2,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_1} \cos \mu_{R_2} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a\tau \right]; \quad (34)$$

$$\theta_{цс} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a\tau \right]; \quad (35)$$

$$\theta_{R_1z,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_1} \cos \mu_{R_3} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a\tau \right]; \quad (36)$$

$$\theta_{R_2z,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_2} \cos \mu_{R_3} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a\tau \right]; \quad (37)$$

$$\theta_{R_1R_2R_3} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_1} \cos \mu_{R_2} \cos \mu_{R_3} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a\tau \right] \quad (38)$$

$$\theta_{цс} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_3} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a\tau \right]; \quad (39)$$

В соответствии с методикой расчета параметров для «неограниченной пластины» для каждой из пластин $2R_1, 2R_2$ и $2R_3$ находится число Bi ,

параметры A_R и μ_R , модуль поверхности $M_{ПР}$, коэффициент экзотермии $K_{\tau R}$, общие для параллелепипеда избыточные температуры θ_H и θ_k и темп остывания m .

Темп остывания m определяется выражением:

$$m = \left(\frac{\mu_{R_1^2}}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2^2}}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3^2}}{R_3^2} \right) a, \quad (40)$$

Далее для каждой избыточной температуры (32) – (39) определяются:

- условная избыточная начальная температура при $\tau = 0$:

$$\theta_{YHRi} = k_{\tau} \theta_H A_1 A_2 A_3 \cos \mu_{Ri}; \quad (41)$$

- продолжительность остывания τ_{Ri} до температуры θ_k :

$$\tau_{Ri} = \frac{\ln \theta_{YHRi} - \ln \theta_k}{m}; \quad (42)$$

- средняя избыточная температура $\theta_{cp.Ri}$ за время остывания:

$$\theta_{cp.Ri} = \frac{\theta_{YHRi}}{m \cdot \tau_{Ri}} [1 - \exp(-m \cdot \tau_{Ri})] \quad (43)$$

Пример расчета остывания конструкции типа «прямоугольный параллелепипед»

Задача. Рассчитать продолжительность остывания до температуры $T_k = 0^\circ\text{C}$ поверхностей, угла и центра (в двух уровнях – в среднем сечении и на верхней грани) короткого столба 0,4·0,8·1,6 м, образованного пересечением трех пластин толщиной $2R_1 = 0,8$ м; $2R_2 = 0,4$ м; $2R_3 = 1,6$ м при следующих условиях: температура бетона, уложенного в конструкцию $T_H = 80^\circ\text{C}$; коэффициент теплопроводности бетона $\lambda = 1,3$ Вт/м $^\circ\text{C}$, температуропроводности $a = 22 \cdot 10^{-4}$ м 2 /ч; коэффициент теплообмена $\alpha = 5$ Вт/м 2 $^\circ\text{C}$; бетон М300 приготовлен на портландцементе марки 400 при расходе 300 кг/м 3 .

Решение.

1. Для заданных условий применительно к пластине $2R_1 = 0,8$ м:

$$M_{П} = \frac{2 \cdot M^2}{0,8 \cdot M^3} = 2,5 M^{-1}; \quad Bi_{R_1} = \alpha R \lambda^{-1} = 5 \cdot 0,4 \cdot 1,3^{-1} = 1,54$$

$$\mu_{R_1^2} = 2,5(1 + 2,25 Bi^{-1})^{-1} = 2,5(1 + 2,25 \cdot 1,54^{-1})^{-1} = 1,01; \quad \mu_{R_1} = 1,0$$

$$A_{R_1} = \frac{2 \sin \mu_{R_1}}{\mu_{R_1} + \sin \mu_{R_1} \cos \mu_{R_1}} = \frac{2 \sin 1,0}{1,0 + \sin 1,0 \cdot \cos 1,0} = 1,15$$

$$K_{\tau} = 1,33 \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 2,5)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,32$$

2. Для заданных условий применительно к пластине $2R_2 = 0,4$ м:

$$M_{II} = \frac{2M^2}{0,4M^3} = 5M^{-1}; \quad Bi_{R_2} = \alpha R \lambda^{-1} = 5 \cdot 0,2 \cdot 1,3^{-1} = 0,77$$

$$\mu_{R_2}^2 = 2,5(1 + 2,25Bi^{-1})^{-1} = 2,5(1 + 2,25 \cdot 0,77^{-1})^{-1} = 0,63; \quad \mu_{R_2} = 0,79$$

$$A_{R_2} = \frac{2 \sin 0,79}{0,79 + \sin 0,79 \cdot \cos 0,79} = 1,08$$

$$K_{\tau_2} = 1,33 \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 5)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,32$$

3. Для заданных условий применительно к пластине $2R_3 = 1,6$ м:

$$M_{II} = \frac{2M^2}{1,6M^3} = 1,25M^{-1}; \quad Bi_{R_1} = \alpha R \lambda^{-1} = 5 \cdot 0,8 \cdot 1,3^{-1} = 3,08$$

$$\mu_{R_1}^2 = 2,5(1 + 2,25 \cdot 3,08^{-1})^{-1} = 1,44; \quad \mu_{R_1} = 1,2$$

$$A_{R_3} = \frac{2 \sin 1,2}{1,2 + \sin 1,2 \cdot \cos 1,2} = 1,21$$

$$K_{\tau_3} = 1,33 \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 1,25)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,32$$

4. Для обеих пластин:

$$\theta_n = 80 - (-10) = 90^\circ C; \quad \theta_k = 0 - (-10) = 10^\circ C$$

темп остывания m в соответствии с (40):

$$m = \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a = \left(\frac{1,0^2}{0,4^2} + \frac{0,79^2}{0,2^2} + \frac{1,2^2}{0,8^2} \right) 22 \cdot 10^{-4} = 0,053.$$

5. Вычисляем условные избыточные начальные температуры по (41):

$$\theta_{yHR_1} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 1,0 = 96,4^\circ C;$$

$$\theta_{yHR_2} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 0,79 = 125,8^\circ C;$$

$$\theta_{yHR_2R_1} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 1,0 \cdot \cos 0,79 = 68^\circ C;$$

$$\theta_{yHII} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 = 178,6^\circ C.$$

$$\theta_{yHR_2Z} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 1,0 \cdot \cos 1,21 = 34,7^\circ C$$

$$\theta_{yHR_2Z} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 0,79 \cdot \cos 1,21 = 45,0^\circ C$$

$$\theta_{yHR_2R_1} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 1,0 \cdot \cos 0,79 \cdot \cos 1,2 = 24,3^\circ C$$

$$\theta_{yHII Z} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 1,2 = 64,3^\circ C$$

6. Продолжительность остывания τ_{Ri} до θ_k определяется по (42):

$$\tau_{R_1} = \frac{\ln 96,4 - \ln 10}{0,053} = 42,7 \text{ ч}$$

$$\tau_{R_2} = \frac{\ln 125,8 - \ln 10}{0,053} = 47,7 \text{ ч}$$

$$\tau_{R_1, R_2} = \frac{\ln 68 - \ln 10}{0,053} = 36,2 \text{ ч}$$

$$\tau_{II} = \frac{\ln 178,6 - \ln 10}{0,053} = 54,4 \text{ ч}$$

$$\tau_{R_1, Z} = \frac{\ln 34,7 - \ln 10}{0,053} = 23,5 \text{ ч}$$

$$\tau_{R_2, Z} = \frac{\ln 45,0 - \ln 10}{0,053} = 28,4 \text{ ч}$$

$$\tau_{R_1, R_2, R_3} = \frac{\ln 24,3 - \ln 10}{0,053} = 16,8 \text{ ч}$$

$$\tau_{II, Z} = \frac{\ln 64,3 - \ln 10}{0,053} = 35,1 \text{ ч}$$

7. Средняя избыточная температура $\theta_{cp, Ri}$ за время определяется по (43):

$$\theta_{cp, R_1} = \frac{96,4}{0,053 \cdot 42,7} [1 - \exp(-0,053 \cdot 42,7)] = 38,1^\circ C$$

$$\theta_{cp, R_2} = \frac{125,8}{0,053 \cdot 47,7} [1 - \exp(-0,053 \cdot 47,7)] = 45,8^\circ C$$

$$\theta_{cp, R_1, R_2} = \frac{68}{0,053 \cdot 36,2} [1 - \exp(-0,053 \cdot 36,2)] = 30,2^\circ C$$

$$\theta_{cp, II} = \frac{178,6}{0,053 \cdot 54,4} [1 - \exp(-0,053 \cdot 54,4)] = 58,5^\circ C$$

$$\theta_{cp, R_1, Z} = \frac{34,7}{0,053 \cdot 23,5} [1 - \exp(-0,053 \cdot 23,5)] = 19,8^\circ C$$

$$\theta_{cp, R_2, Z} = \frac{45,0}{0,053 \cdot 28,4} [1 - \exp(-0,053 \cdot 28,4)] = 23,2^\circ C$$

$$\theta_{cp, R_1, R_2, R_3} = \frac{24,3}{0,053 \cdot 16,8} [1 - \exp(-0,053 \cdot 16,8)] = 16,1^\circ C$$

$$\theta_{cp, II, Z} = \frac{64,3}{0,053 \cdot 35,1} [1 - \exp(-0,053 \cdot 35,1)] = 28,2^\circ C$$

8. Средние температуры составляют:

$$T_{cp,R_1} = \theta_{cp,R_1} + T_{HB} = 38,1 + (-10) = 28,1^\circ C$$

$$T_{cp,R_2} = \theta_{cp,R_2} + T_{HB} = 45,8 + (-10) = 35,8^\circ C$$

$$T_{cp,R_1R_2} = \theta_{cp,R_1R_2} + T_{HB} = 30,2 + (-10) = 20,2^\circ C$$

$$T_{cp,Ц} = \theta_{cp,Ц} + T_{HB} = 58,5 + (-10) = 48,5^\circ C$$

$$T_{cp,R_1Z} = \theta_{cp,R_1Z} + T_{HB} = 19,8 + (-10) = 9,8^\circ C$$

$$T_{cp,R_2Z} = \theta_{cp,R_2Z} + T_{HB} = 23,2 + (-10) = 13,2^\circ C$$

$$T_{cp,R_1R_2R_3} = \theta_{cp,R_1R_2R_3} + T_{HB} = 16,1 + (-10) = 6,1^\circ C$$

$$T_{cp,ЦZ} = \theta_{cp,ЦZ} + T_{HB} = 29,2 + (-10) = 19,2^\circ C$$

9. При расчете термосного остывания по методике Б.Г. Скрамтаева имеют место следующие результаты:

- средняя температура бетона (всего!) за период остывания $t_{б,ср}$:

$$t_{б,ср} = \frac{80 - 0}{1,03 + 0,181 \cdot 8,7 + 0,006(80 - 0)} = 25,9^\circ C$$

- продолжительность остывания бетона (всего!) от $T_n = 80^\circ C$ до $T_k = 0^\circ C$ составляет:

$$\tau = \frac{1,05 \cdot 2400(80 - 0) + 300 \cdot 165}{3,6 \cdot 5 \cdot 8,7(25,9 - (-10))} 44,6 \text{ ч}$$

Практические приемы определения продолжительности остывания

Знание закономерностей формирования температурного поля, рассмотренных в настоящей главе, и использование понятия темпа остывания создают чрезвычайно простые возможности прогнозирования продолжительности остывания конструкций на основе замеров температуры в фиксированных точках непосредственно на строительной площадке.

1. Определение продолжительности остывания по замеренной температуре центра и поверхности конструкции типа «неограниченная пластина».

Не ранее чем через 10 часов после начала остывания, - чтобы дать остыванию выйти на регулярный режим, - производятся замеры температуры центра $T_{ц}$ и температуры поверхности $T_{п}$ остывающей конструкции. С учетом температуры наружного воздуха определяются $\theta_{ц} = T_{ц} - T_{нв}$ и $\theta_{п} = T_{п} - T_{нв}$. Из соотношений (4) и (5) следует, что $\theta_{п} = \theta_{ц} \cos \mu_1$, откуда вычисляется сначала $\cos \mu_1$, а затем и μ_1 .

Зная температуропроводность бетона a и размеры конструкции R и с учетом найденного μ_1 рассчитывается темп остывания m на основе формулы (11). Устанавливается температура поверхности $T_{пк}$, до достижения которой от

температуры $T_{п}$ требуется определить продолжительность $\tau_{пк}$, приняв соответственно $\theta_{пк} = T_{пк} - T_{нв}$. Далее по (12) определяется продолжительность

остывания $\tau_{пк}$, а по (17) средняя температура поверхности $T_{п.ср.}$ за время остывания от температуры $T_{п}$ до температуры $T_{к}$. По этим двум показателям - $T_{п.ср.}$ и $\tau_{пк}$ устанавливается набранная за этот период величина относительной прочности бетона.

Пример расчета. В бетонной стенке толщиной $2R = 0,6$ м (температуропроводность бетона $a = 22 \cdot 10^{-4}$ м²/ч) через несколько часов после начала остывания произведены замеры температуры центра $T_{ц}$ и температуры поверхности $T_{п}$. В результате получено $T_{ц} = 60^{\circ}\text{C}$ и $T_{п} = 40^{\circ}\text{C}$. Требуется рассчитать через какое время температура поверхности достигнет температуры $T_{пк} = 5^{\circ}\text{C}$. Температура наружного воздуха $T_{нв} = -10^{\circ}\text{C}$.

$$1. \theta_{п} = T_{п} - T_{нв} = 40 - (-10) = 50^{\circ}\text{C};$$

$$\theta_{ц} = T_{ц} - T_{нв} = 60 - (-10) = 70^{\circ}\text{C};$$

$$\theta_{пк} = T_{к} - T_{нв} = 5 - (-10) = 15^{\circ}\text{C}.$$

2. Из соотношения $\theta_{п} = \theta_{ц} \cos \mu_1$ находим $\cos \mu_1$ и μ_1 :

$$\cos \mu_1 = \frac{\theta_{п}}{\theta_{ц}} = \frac{50}{70} = 0,714; \quad \mu_1 = 0,775$$

3. Из соотношения $m = -\mu_1^2 a R^{-2}$ определяем темп остывания:

$$m = -0,775^2 \cdot 22 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3^{-2} = -0,0147$$

4. Определяется продолжительность остывания $\tau_{пк}$:

$$\tau_{пк} = \frac{\ln \theta_{пк} - \ln \theta_{п}}{m} = \frac{\ln 15 - \ln 50}{-0,0147} = 82 \text{ часа.}$$

2. Определение продолжительности остывания по замеренной температуре центра и поверхности конструкции «протяженный брус».

Через несколько часов после начала остывания производятся замеры температуры центра $T_{ц}$ и температуры поверхности T_{R1} и T_{R2} . Из соотношений (21) и (22) и с учетом $\theta_{ц} = T_{ц} - T_{нв}$ и $\theta_{R1} = T_{R1} - T_{нв}$ устанавливается $\theta_{R1} = \theta_{ц} \cos \mu_{R1}$, а из соотношений (22) и (24) и с учетом $\theta_{R2} = T_{R2} - T_{нв}$ устанавливается $\theta_{R2} = \theta_{ц} \cos \mu_{R2}$, откуда вычисляется сначала $\cos \mu_{R1}$ и $\cos \mu_{R2}$, а затем и μ_{R1} и μ_{R2} .

По полученным значениям μ_{R1} и μ_{R2} и известным a , R_1 и R_2 находится по (25) темп остывания m . По (27) рассчитывается продолжительность остывания до заданной температуры $T_{к}$ (соответственно $\theta_{к} = T_{к} - T_{нв}$) поверхности R_1 и R_2 .

Пример расчета. В бетонной колонне сечением $2R_1 \cdot 2R_2$, где $2R_1 = 0,8$ м и $2R_2 = 0,4$ м через несколько часов после начала остывания произведены замеры температуры центра и двух поверхностей: $T_{ц} = 61,9^{\circ}\text{C}$; $T_{R1} = 28,8^{\circ}\text{C}$ и $T_{R2} = 40,6^{\circ}\text{C}$. Требуется рассчитать через какое время температура поверхностей

достигнет температуры $T_k = 5^\circ\text{C}$. Температура наружного воздуха $T_{\text{нв}} = -10^\circ\text{C}$, температуропроводность бетона $a = 22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$.

$$\begin{aligned} 1. \theta_{\text{ц}} &= T_{\text{ц}} - T_{\text{нв}} = 61,9 - (-10) = 71,9^\circ\text{C}; \\ \theta_{R_1} &= T_{R_1} - T_{\text{нв}} = 28,8 - (-10) = 38,8^\circ\text{C}; \\ \theta_{R_2} &= T_{R_2} - T_{\text{нв}} = 40,6 - (-10) = 50,6^\circ\text{C}; \\ \theta_K &= T_K - T_{\text{нв}} = 5 - (-10) = 15^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

2. Из соотношения $\theta_{R_1} = \theta_{\text{ц}} \cos \mu_{R_1}$ находим $\cos \mu_{R_1}$ и μ_{R_1} :

$$\cos \mu_{R_1} = \frac{38,8}{71,9} = 0,54; \quad \mu_{R_1} = 1,0$$

3. Из соотношения $\theta_{R_2} = \theta_{\text{ц}} \cos \mu_{R_2}$ находим $\cos \mu_{R_2}$ и μ_{R_2} :

$$\cos \mu_{R_2} = \frac{50,6}{71,9} = 0,70; \quad \mu_{R_2} = 0,79$$

4. По (2.114) находим темп остывания m :

$$m = - \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} \right) a = - \left(\frac{1}{0,4^2} + \frac{0,79^2}{0,2^2} \right) \cdot 22 \cdot 10^{-4} = -0,048$$

5. По (2.116) и (2.117) определяем продолжительность остывания до $+5^\circ\text{C}$ поверхности R_1 :

$$\tau_{R_1} = \frac{\ln \theta_{R_1} - \ln \theta_K}{m} = \frac{\ln 38,8 - \ln 15}{0,048} = 19,8 \text{ ч}$$

и поверхности R_2 :

$$\tau_{R_2} = \frac{\ln \theta_{R_2} - \ln \theta_K}{m} = \frac{\ln 50,6 - \ln 15}{0,048} = 25,3.$$

3. Определение темпа остывания по двум последовательным замерам температуры поверхности.

Замеры температуры в одной и той же точке поверхности, сделанные через несколько часов при известной температуре наружного воздуха, позволяют рассчитать темп остывания этой поверхности. Если температуры составляют T_{τ_1} и T_{τ_2} , а время между замерами τ , то при температуре наружного воздуха $T_{\text{нв}}$ темп остывания составляет:

$$m = \frac{\ln \theta_{\tau_1} - \ln \theta_{\tau_2}}{\tau} = \frac{\ln(T_{\tau_1} - T_{\text{нв}}) - \ln(T_{\tau_2} - T_{\text{нв}})}{\tau}$$

Найденное значение m позволит определить продолжительность остывания $\tau_{\text{охл.}}$ точки от температуры T_{τ_2} до температуры T_k ($\theta_k = T_k - T_{\text{нв}}$):

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{\ln \theta_{t_2} - \ln \theta_k}{m}.$$

Пример расчета. Замеры температуры в одной точке поверхности, сделанные через 5 часов один после одного дали следующие результаты: $T_{t_1} = 50^\circ\text{C}$; $T_{t_2} = 45,2^\circ\text{C}$. Температура наружного воздуха $T_{\text{нв}} = -10^\circ\text{C}$. Найти продолжительность остывания этой точки до температуры $T_k = 0^\circ\text{C}$.

1. $\theta_{t_1} = 50 - (-10) = 60^\circ\text{C}$;

$$\theta_{t_2} = 45,2 - (-10) = 55,2^\circ\text{C};$$

$$\theta_k = 0 - (-10) = 10^\circ\text{C}.$$

2. Определяем темп остывания:

$$m = \frac{\ln 60 - \ln 55,2}{5} = 0,0167.$$

3. Определим продолжительность остывания от $45,2^\circ\text{C}$ до 0°C :

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{\ln 55,2 - \ln 10}{0,0167} = 102 \text{ ч.}$$

Пример расчета режимов термовиброобработки бетонной смеси и выдерживания бетона

Требуется рассчитать температуру разогрева растворной части бетонной смеси, температурный режим выдерживания бетона и определить его прочность в возрасте 12 и 24 часа.

Исходные данные. Бетон М-300 (В22,5). Состав бетонной смеси: портландцемент Пикалевского завода М-400 $P_u = 400 \text{ кг/м}^3$; песок $M_{кр} = 2,1$ $P_n = 600 \text{ кг/м}^3$; щебень гранитный крупностью зерен до 20 мм $P_{кз} = 1200 \text{ кг/м}^3$; вода $P_a = 200 \text{ л/м}^3$. Начальная температура бетонной смеси $t_{нбс} = +15^\circ \text{C}$. Температура разогрева бетонной смеси $t_{рбс} = +75^\circ \text{C}$.

Бетонируемая конструкция – ригель сечением 0,4х0,6 м, длиной 6,0 м. Удельный расход арматуры $P_A = 170 \text{ кг/м}^3$.

Конструкция утепленной опалубки: доска 25 мм, пенопласт 30 мм, фанера 4 мм. Неопалубленная поверхность укрыта минеральной ватой толщиной 50 мм по слою полиэтиленовой пленки.

Температура наружного воздуха $t_{нв} = -15^\circ \text{C}$, скорость ветра до 5 м/с.

Перед бетонированием конструкций бетонная смесь обрабатывается в установке ТВОБС со следующей технической характеристикой:

- производительность $8 \text{ м}^3 / \text{час}$;
- режим работы – непрерывный;
- время прохождения бетонной смеси через камеру разогрева – 1,5 мин.;
- объем камеры разогрева - $0,2 \text{ м}^3$;
- объем загрузочного бункера 3 м^3 .

Решение. Для расчета температуры разогрева растворной части бетонной смеси ($t_{рч}$), по которой осуществляется контроль за режимом обработки смеси, определим температуру недогрева крупного заполнителя:

$$\Delta t_{нкз} = \frac{1}{15} \cdot \frac{B \cdot V^2}{a} = \frac{1}{15} \cdot \frac{2400 \cdot 0,02^2}{0,004} = 16,0^\circ \text{C},$$

где $a = 0,004 \text{ м}^2 / \text{час}$ - температуропроводность гранул гранитного щебня;
 $V = 0,02$ - размер зерен щебня.

$B = \frac{(75 - 15) \cdot 60}{1,5} = 2400^\circ \text{C} / \text{час}$ - скорость разогрева смеси с 15°C до 75°C за 1,5 мин.

Время прохождения смеси (1,5 мин.) по камере разогрева принято по техническим характеристикам установки ТВОБС.

При объеме $V_{бс} = 0,2 \text{ м}^3$ бетонной смеси, проходящей через камеру разогрева установки ТВОБС в каждый момент времени, ее теплоемкость ($C'_{бс}$) составит:

$$C'_{бс} = V_{бс} \cdot \gamma_{бс} \cdot C_{бс} = 0,2 \cdot 2400 \cdot 1,11 = 532,8 \text{ кДж/}^\circ \text{C},$$

где $\gamma_{бс} = 2400 \text{ кг/м}^3$ - плотность бетонной смеси;

$C_{бс} = 1,11 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ \text{C}$ – удельная теплоемкость бетонной смеси.

Теплоемкость растворной части ($C'_{рч}$) бетонной смеси составит:

$$C'_{рч} = V_{бс} \cdot (P_u \cdot C_u + P_v \cdot C_v + P_n \cdot C_n) = 0,2 \cdot (400 \cdot 0,92 + 200 \cdot 4,2 + 600 \cdot 0,857) = 344,4 \text{ кДж/}^\circ \text{C},$$

где P_{II}, P_B, P_{II} - удельные расходы цемента, воды, песка, $\text{кг}/\text{м}^3$;

C_{II}, C_B, C_{II} - удельные теплоемкости цемента, воды, песка, $\text{кДж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$.

Теплоемкость крупного заполнителя ($C'_{кз}$) смеси составит:

$$C'_{кз} = V_{\text{кз}} \cdot P_{кз} \cdot C_{кз} = 0,2 \cdot 1200 \cdot 0,857 = 205,7 \text{ кДж}/^\circ\text{C},$$

где $P_{кз}$ и $C_{кз}$ - удельный расход ($\text{кг}/\text{м}^3$) и удельная теплоемкость крупного заполнителя ($\text{кДж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$).

Составим уравнение теплового баланса бетонной смеси, подвергаемой разогреву:

$$C'_{\text{бс}}(t_{\text{рбс}} - t_{\text{нбс}}) = C'_{\text{рв}}(t_{\text{ррч}} - t_{\text{нбс}}) + C'_{\text{кз}}(t_{\text{ррч}} - t_{\text{нбс}} - \Delta t_{\text{нкз}}).$$

Подставим известные численные выражения в уравнение теплового баланса:

$$532,8 \cdot (75 - 15) = 344,4 \cdot (t_{\text{ррч}} - 15) + 205,7 \cdot (t_{\text{ррч}} - 15 - 16).$$

$$\text{откуда } t_{\text{ррч}} = \frac{532,8 \cdot 60 + 344,4 \cdot 15 + 205,7 \cdot 31}{344,4 + 205,7} = 79,0^\circ\text{C}.$$

Таким образом, для получения температуры бетонной смеси 75°C ее растворная часть должна быть нагрета до 79°C .

Расчет температурного режима твердения бетона.

Объем бетонной смеси, укладываемой в ригель:

$$V_{\text{бс}} = 0,4 \cdot 0,6 \cdot 6 = 1,44 \text{ м}^3.$$

Определим количество тепла, внесенное в бетонную смесь при ее термо-виброобработке $Q_{\text{рв}} = V_{\text{бс}} \cdot C_{\text{бс}} \cdot \gamma_{\text{бс}} \cdot (t_{\text{рбс}} - t_{\text{нбс}}) = 1,44 \cdot 1,11 \cdot 2400 \cdot (75 - 15) = 230169,6 \text{ кДж}$

Примем величину снижения температуры при укладке бетонной смеси в опалубку ($\Delta t_{\text{пту}}$) равной 5°C . При этом имеется в виду, что по мере укладки разогретой смеси в опалубку, ее уплотнения и заглаживания поверхности осуществляется укрытие свежеложенного бетона полиэтиленовой пленкой и плитами минеральной ваты.

В процессе укладки бетонная смесь потеряет часть внесенного тепла ($Q_{\text{пту}}$):

$$Q_{\text{пту}} = V_{\text{бс}} \cdot C_{\text{бс}} \cdot \gamma_{\text{бс}} \cdot (t_{\text{рбс}} - t_{\text{укл}}) = 1,44 \cdot 1,11 \cdot 2400 \cdot \Delta t_{\text{пту}} = 19180,8 \text{ кДж}.$$

Температура уложенной бетонной смеси $t_{\text{укл}}$ составит:

$$t_{\text{укл}} = t_{\text{рбс}} - \Delta t_{\text{пту}} = 75 - 5 = 70^\circ\text{C}.$$

Потери тепла на нагрев арматуры ($Q_{\text{пта}}$):

$$Q_{\text{пта}} = V_{\text{бс}} \cdot P_A \cdot C_A (t_{\text{укл}} - t_{\text{на}}) = 1,44 \cdot 170 \cdot 0,48 \cdot [70 - (-15)] = 9987,8 \text{ кДж}$$

Потери тепла на нагрев деревянной опалубки массой $G_{\text{оп}} = 180 \text{ кг}$ и удельной теплоемкостью $C_{\text{оп}} = 2,52 \text{ кДж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$.

$$Q_{\text{пто}} = G_{\text{оп}} \cdot C_{\text{оп}} (t_{\text{укл}} - t_{\text{на}}) = 180 \cdot 2,52 \cdot [70 - (-15)] = 38556 \text{ кДж}.$$

Снижение температуры бетонной смеси за счет теплотерь на нагрев арматуры и опалубки ($\Delta t_{\text{пво}}$) может быть определено из выражения:

$$V_{\text{бс}} \cdot \gamma_{\text{бс}} \cdot C_{\text{бс}} \cdot \Delta t_{\text{пво}} = Q_{\text{пта}} + Q_{\text{пто}}$$

Подставим известные численные выражения в это уравнение:

$$1,44 \cdot 1,11 \cdot 2400 \cdot \Delta t_{\text{пво}} = 9987,8 + 38566,0$$

откуда $\Delta t_{\text{пво}} = 12,6^\circ\text{C}$.

Таким образом, температура бетонной смеси к началу выдерживания бетона ($t_{\text{бмс}}$) составит:

$$t_{\text{бмс}} = t_{\text{вкл}} - \Delta t_{\text{пко}} = 70 - 12,6 = 57,4^{\circ}\text{C}.$$

В связи с тем, что нагрев арматуры и опалубки происходит достаточно быстро (5-15 мин.) потерями тепла в окружающую среду на этом этапе пренебрегаем.

Тепловыделение за первые 12 часов твердения бетона за счет экзотермии цемента ($Q_{\text{жс}}$): $Q_{\text{жс}} = V_{\text{бс}} \cdot P_{\text{ц}} \cdot \mathcal{E} = 1,44 \cdot 400 \cdot 188 = 108288 \text{ кДж}$,

где $\mathcal{E} = 188 \text{ кДж/кг}$ – удельное тепловыделение портландцемента М-400.

Приняты для температуры твердения 60°C по таблице 4.

За счет экзотермии цемента температура бетона повысится на $\Delta t_{\text{жс}}$:

$$\Delta t_{\text{жс}} = \frac{Q_{\text{жс}}}{V_{\text{б}} \cdot C_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}}} = \frac{108288}{1,44 \cdot 1,05 \cdot 2500} = 28,6^{\circ}\text{C}.$$

Для определения потерь тепла в окружающую среду определим модуль поверхности конструкции ($M_{\text{п}}$) и коэффициент теплопередачи опалубки (K).

Для линейно-протяженных конструкций модуль поверхности определяется отношением периметра поперечного сечения к площади поперечного сечения:

$$M_{\text{п}} = \frac{(0,4 + 0,6) \cdot 2}{0,4 \cdot 0,6} = 8,3 \text{ м}^{-1}.$$

Коэффициент теплопередачи опалубленной поверхности (K_1) для принятой конструкции опалубки $K_1 = 0,8 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, а для открытой утепленной поверхности $K_2 = 1,31 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ (табл. 1).

Приведенный коэффициент теплопередачи определяют с учетом площадей опалубленной (F_1) и неопалубленной поверхности (F_2), через которые происходят теплопотери. В данном случае для ригеля, как линейно-протяженной конструкции, вместо площадей охлаждения правомерно использовать периметры поперечного сечения конструкции:

$$K = \frac{l_1 \cdot K_1 + l_2 \cdot K_2}{l_1 + l_2} = \frac{(2 \cdot 0,6 + 0,4) \cdot 0,8 + 0,4 \cdot 1,31}{2 \cdot 0,6 + 0,4 + 0,4} = 0,9 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}.$$

Потери тепла в окружающую среду за первые 12 часов выдерживания конструкции:

$$Q_{\text{пт}} = 3,6 \cdot \tau_{\text{выд}} \cdot K \cdot M_{\text{п}} \cdot \left(t_{\text{бмс}} + \frac{\Delta t_{\text{жс}}}{2} - t_{\text{на}} \right) = 3,6 \cdot 12 \cdot 0,9 \cdot 8,3 \cdot \left[57,4 + \frac{28,6}{2} - (-15) \right] = 27978,4 \text{ кДж}$$

С учетом вычисленных составляющих уравнения теплового баланса определим температуру бетона конструкции к концу 12-го часа выдерживания:

$$t_{\text{бмс}(12)} = \frac{Q_{\text{ржс}} - Q_{\text{пты}} - Q_{\text{пмо}} - Q_{\text{пма}} + Q_{\text{жс}} - Q_{\text{пт}}}{V_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{б}} \cdot C_{\text{б}} + G_{\text{от}} \cdot C_{\text{от}} + V_{\text{б}} \cdot P_{\text{а}} \cdot C_{\text{а}}} = \frac{230169,6 - 19180,8 - 38556,0 - 9987,8 + 108288 - 27978,4}{1,44 \cdot 2500 \cdot 1,05 + 1,44 \cdot 170 \cdot 0,48 + 180 \cdot 2,52} = 55,8^{\circ}\text{C}.$$

При выдерживании бетона в последующие 12 часов в уравнении теплового баланса изменится $Q_{\text{жс}}$ и $Q_{\text{пт}}$ (внутренние тепловыделения будут нарастать одновременно с увеличением теплопотерь в окружающую среду).

К концу 24-го часа суммарные тепловыделения цемента ($Q_{\text{жс}}$) составят:

$$Q_{\text{жс}} = V_{\text{б}} \cdot P_{\text{ц}} \cdot \mathcal{E} = 1,44 \cdot 400 \cdot 209 = 120384,0 \text{ кДж}$$

где \mathcal{E} - удельные тепловыделения цемента в суточном возрасте бетона при температуре 55°C .

При этом прирост температуры $\Delta t_{жз}$ составит:

$$\Delta t_{жз} = \frac{Q_{жз}}{V_{\bar{b}} \cdot C_{\bar{b}} \cdot \gamma_{\bar{b}}} = \frac{120384}{1,44 \cdot 1,05 \cdot 2800} = 31,8^{\circ}\text{C}.$$

Потери тепла в окружающую среду к концу 24-го часа выдерживания бетона составят:

$$Q_{не} = 3,6 \tau_{выд} \cdot K \cdot M_{п} \cdot \left(t_{\bar{b}не} + \frac{\Delta t_{жз}}{2} - t_{oc} \right) = 3,6 \cdot 24 \cdot 0,9 \cdot 8,3 \cdot \left[57,4 - \frac{31,8}{2} - (-15) \right] = 56989,5 \text{ кДж}$$

Температура бетона к концу 24-го часа выдерживания составит:

$$t_{\bar{b}жз(24)} = \frac{Q_{ржз} - Q_{пмв} - Q_{пма} - Q_{пма} + Q_{жз} - Q_{не}}{V_{\bar{b}} \cdot \gamma_{\bar{b}} \cdot C_{\bar{b}} + G_{оп} \cdot C_{оп} + V_{\bar{b}} \cdot P_a \cdot C_a} =$$

$$= \frac{230169,6 - 19180,8 - 38556,0 - 9987,8 + 120384,0 - 56989,5}{1,44 \cdot 2500 \cdot 1,05 + 1,44 \cdot 170 \cdot 0,48 + 180 \cdot 2,52} = 51,9^{\circ}\text{C}.$$

Определение прочности бетона.

В результате расчета температурного режима получено: температура к началу выдерживания бетона $t_{\bar{b}н} = 57,4^{\circ}\text{C}$; температура к концу первых 12-ти часов $t_{\bar{b}жз(12)} = 55,8^{\circ}\text{C}$.

Средняя температура за первые 12 часов твердения бетона

$$t_{\bar{b},ср(12)} = \frac{57,4 + 55,8}{2} = 56,6^{\circ}\text{C}.$$

Температура бетона к концу 24-го часа составила $t_{\bar{b}жз(24)} = 51,9^{\circ}\text{C}$.

Средняя температура за вторые 12 часов твердения бетона

$$t_{\bar{b},ср(24)} = \frac{55,8 + 51,9}{2} = 53,8^{\circ}\text{C}.$$

По табл. 2 определяем относительный возраст бетона, который за 12 часов твердения при температуре $56,6^{\circ}\text{C}$ составляет 4,8 сут., а при температуре $53,8^{\circ}\text{C}$ составляет 4,3 суток. К концу 24-го часа суммарный относительный возраст бетона составит $4,8 + 4,4 = 9,1$ суток.

По табл. 3 определяем относительную прочность бетона, которая за 12 часов твердения составит 49,6%, а за 24 часа – 65% от R_{28} .

Таблица 1

**Коэффициенты теплопередачи опалубок и укрытий неопалубленной
поверхности бетона различной конструкции**

Тип опалубки	Материал опалубки	Толщина слоя	Коэффициент K , Вт/м ² ·°С, при скорости ветра, м/с		
			0	5	15
I	Доска	25	2,44	5,2	5,98
II	Доска	40	2,03	3,6	3,94
III	Доска	25	1,8	3	3,25
	Толь	-			
IV	Доска	25	0,67	0,8	0,82
	Пенопласт	30			
	Фанера	4			
V	Доска	25	0,87	1,07	1,1
	Толь	-			
	Вата минеральная	50			
	Фанера	4			
VI	Металл	3	1,02	1,27	1,33
	Вата минеральная	50			
	Фанера	4			
VII	Фанера	10	2,44	5,1	5,8
	Асбест	4			
	Фанера	10			
VIII	Толь	-	0,74	0,89	0,9
	Опилки	100			
IX	Толь	-	1,27	1,77	1,87
	Шлак	150			
X	Толь Вата минеральная	- 50	1,01	1,31	1,37

Таблица 2

**Значения приведенных к изотерме 18°C длительного выдерживания
бетона в сутках в зависимости от интервала между замерами
и его средней температуры**

t _{ср.} , °C	Интервал между измерениями, в час.											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
12	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
14	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
16	0	0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4
18	0	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5
20	0	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5
22	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6
24	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7
26	0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8
28	0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9
30	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
32	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
34	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3
36	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4
38	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6
40	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	1,8
42	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1
44	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3
46	0,2	0,4	0,6	0,8	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,2	2,4	2,6
48	0,2	0,5	0,7	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0
50	0,2	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4
52	0,3	0,6	0,9	1,2	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,2	3,5	3,8
54	0,3	0,7	1,0	1,4	1,8	2,1	2,5	2,8	3,2	3,6	3,9	4,3
56	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8
58	0,4	0,9	1,3	1,8	2,3	2,7	3,2	3,6	4,1	4,6	5,0	5,5
60	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,1	3,6	4,1	4,6	5,1	5,7	6,2
62	0,5	1,1	1,7	2,3	2,9	3,5	4,0	4,6	5,2	5,8	6,4	7,0
64	0,6	1,3	1,9	2,6	3,2	3,9	4,6	5,2	5,9	6,5	7,2	7,9
66	0,7	1,4	2,2	2,9	3,7	4,4	5,2	5,9	6,6	7,4	8,1	8,9
68	0,8	1,6	2,5	3,3	4,1	5,0	5,8	6,7	7,5	8,3	9,2	10,0
70	0,9	1,8	2,8	3,7	4,7	5,6	6,6	7,5	8,5	9,4	10,3	11,3
72	1,0	2,1	3,1	4,2	5,3	6,3	7,4	8,5	9,5	10,6	11,7	12,7
74	1,2	2,4	3,6	4,8	6,0	7,2	8,4	9,6	10,8	12,0	13,2	14,4
76	1,3	2,7	4,0	5,4	6,7	8,1	9,4	10,8	12,1	13,5	14,9	16,2
78	1,5	3,0	4,5	6,1	7,6	9,1	10,6	12,2	13,7	15,2	16,8	18,3
80	1,7	3,4	5,1	6,8	8,6	10,3	12,0	13,7	15,4	17,2	18,9	20,6
82	1,9	3,8	5,8	7,7	9,7	11,6	13,5	15,5	17,4	19,4	21,3	23,3
84	2,1	4,3	6,5	8,7	10,9	13,1	15,3	17,5	19,7	21,8	24,0	26,2
86	2,4	4,9	7,4	9,8	12,3	14,8	17,2	19,7	22,2	24,6	27,1	29,6
88	2,7	5,5	8,3	11,1	13,9	16,6	19,4	22,2	25,0	27,8	30,6	33,3
90	3,1	6,2	9,4	12,5	15,6	18,8	21,9	25,1	28,2	31,3	34,5	37,6

Таблица 3

Кинетика нарастания прочности бетона в процентах от $R_{(28)}$
при $T = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (по Г.Д. Вишневскому)

Целые сутки	Десятые доли суток									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,8	7,9	11,1	13,6	15,6	17,4	19,0	20,4	21,7	23,0
1	24,2	25,3	26,3	27,4	28,3	29,2	30,1	31,0	31,8	32,6
2	33,4	34,2	34,9	35,6	36,3	37,0	37,7	38,3	39,0	39,6
3	40,2	40,8	41,4	42,0	42,6	43,1	43,7	44,2	44,7	45,2
4	45,8	46,3	46,8	47,2	47,7	48,2	48,7	49,1	49,6	50,0
5	50,5	50,9	51,4	51,8	52,2	52,6	53,0	53,4	53,8	54,2
6	54,6	55,0	55,4	55,8	56,2	56,5	56,9	57,3	57,6	58,0
7	58,4	58,7	59,1	59,4	59,8	60,1	60,4	60,8	61,1	61,4
8	61,8	62,1	62,4	62,7	63,0	63,3	63,6	64,0	64,3	64,6
9	64,9	65,2	65,5	65,7	66,0	66,3	66,6	66,9	67,2	67,5
10	67,7	68,0	68,3	68,6	68,8	69,1	69,4	69,6	69,9	70,2
11	70,4	70,7	70,9	71,2	71,4	71,7	71,9	72,2	72,4	72,7
12	72,9	73,2	73,4	73,7	73,9	74,1	74,4	74,6	74,8	75,1
13	75,3	75,5	75,7	76,0	76,2	76,4	76,6	76,9	77,1	77,3
14	77,5	77,7	78,0	78,2	78,4	78,6	78,8	79,0	79,2	79,4
15	79,6	79,8	80,0	80,2	80,4	80,7	80,9	81,1	81,2	81,4
16	81,6	81,8	82,0	82,2	82,4	82,6	82,8	83,0	83,2	83,4
17	83,6	83,7	83,9	84,1	84,3	84,5	84,7	84,8	85,0	85,2
18	85,4	85,6	85,7	85,9	86,1	86,3	86,4	86,6	86,8	87,0
19	87,1	87,3	87,5	87,6	87,8	88,0	88,1	88,3	88,5	88,6
20	88,8	89,0	89,1	89,3	89,5	89,6	89,8	89,9	90,1	90,3
21	90,4	90,6	90,7	90,9	91,0	91,2	91,3	91,5	91,6	91,8
22	92,0	92,1	92,3	92,4	92,6	92,7	92,9	93,0	93,1	93,3
23	93,4	93,6	93,7	93,9	94,0	94,2	94,3	94,4	94,6	94,7
24	94,9	95,0	95,2	95,3	95,4	95,6	95,7	95,8	96,0	96,1
25	96,3	96,4	96,5	96,7	96,8	96,9	97,1	97,2	97,3	97,5
26	97,6	97,7	97,8	98,0	98,1	98,2	98,4	98,5	98,6	98,7
27	98,9	99,0	99,1	99,3	99,4	99,5	99,6	99,8	99,9	100

Таблица 4

**Тепловыделение цемента различных видов и марок в зависимости от температуры
твердения и времени твердения**

Вид и марка цемента	Темпе- ратура, °C	Тепловыделение цемента, кДж/кг, при времени их твердения, сут.							
		0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
портландцемент 300	5	-	-	25	58	84	167	209	230
	10	8	25	42	84	126	188	230	272
	20	25	42	75	126	167	230	251	293
	40	50	84	147	188	230	251	293	-
	60	83	147	188	230	272	298	-	-
портландцемент 400	5	-	-	29	109	109	188	209	251
	10	12	25	50	146	146	209	251	293
	20	42	67	105	209	209	272	314	335
	40	84	134	188	272	272	314	335	-
	60	130	188	230	314	314	335	-	-
портландцемент 500, 600	5	12	25	42	89	125	188	230	272
	10	25	42	63	105	167	251	393	314
	20	42	84	125	188	251	292	335	377
	40	105	167	209	272	293	356	377	-
	60	188	230	272	314	356	377	-	-
портландцемент стротвердеющий 600	5	25	33	50	105	147	209	251	314
	10	33	50	75	125	167	372	335	377
	20	63	105	147	209	293	335	377	419
	40	117	188	230	293	335	377	419	-
	60	209	251	293	335	377	419	-	-
такопортландцемент и щолановый портланд- мент 300	5	-	12	25	42	63	126	167	188
	10	-	25	33	63	105	167	209	230
	20	-	33	62	125	147	209	251	272
	40	42	75	117	167	209	251	272	-
	60	63	105	147	209	230	272	-	-

Предварительный электроразогрев бетонных смесей в автобетоносмесителях.

Принципиально оснащение автобетоносмесителя электродной системой может быть представлено в следующем виде.

Во внутренней полости барабана автобетоносмесителя консольно к сферическому днищу прикрепляется с помощью фланцевого соединения электродная система, имеющая форму шнека. Электроды располагаются на несущей осевой трубе, имеющей шпонку для предотвращения прокручивания лопастей. Между собой и от трубы электроды отделены изоляторами. Коммутирующие провода проходят внутри трубы, являющейся осью электродного шнека, через опорный пятак наружу к токосъемнику. Прибывший на пост электроразогрева автобетоносмеситель через токосъемник подсоединяется к источнику питания, на электроды подается напряжение 380 или 220 В и при вращении барабана происходит разогрев смеси до требуемой температуры.

Разогрев бетонной смеси в барабане автобетоносмесителя имеет по сравнению с электроразогревом в бункере или в кузове автосамосвала ряд отличительных особенностей.

При разогреве в барабане автобетоносмесителя ведется электроразогрев движущейся, побуждаемой или перемешиваемой смеси.

Разогреваемая бетонная смесь двигается внутри барабана как относительно его стенок, так и относительно электродов. Одновременному и непосредственному электроразогреву подвергается не весь объем бетонной смеси, а лишь та его часть, которая в данный момент находится в зоне действия электродов. Полученное бетонной смесью в зоне электродов джоулево тепло тут же в процессе перемешивания отводится во внутренние слои и перераспределяется, в конечном счете, по всему объему. Последующее, после завершения разогрева, одно-двухминутное перемешивание разогретой смеси обеспечивает практически полную равномерность распределения температуры по всему объему.

Вместе с тем, при традиционных способах электроразогрева в бункерах (бадьях) или в кузове самосвала электрическая система состоит (не считая магистральных и коммутационных проводов) из электродной группы, - обеспечивающей подвод напряжения; бетонной смеси - являющейся непосредственным активным сопротивлением; и корпуса бетонотранспортной емкости, - как правило, стального, влияющего на распределение электрического поля в объеме разогреваемой смеси и определяющего характер работы фаз электрической цепи, соединяющихся соответственно по схеме треугольника, звезды или по смешанной схеме. Симметричное расположение плоскостей фазовых электродов относительно стальных стенок транспортной емкости позволяет обеспечить равнозначную загрузку фаз.

Симметрия электрической цепи относительно среднего электрода обеспечивает равенство сопротивлений сторон треугольника и сопротивление лучей звезды. Расчетным путем определяются α - расстояния от электрода до металлической плоскости бетонотранспортной емкости, и β - расстояния между

электродами, приводящие к такой транспозиции электродов, которая обеспечит симметрию фаз, равенство линейных токов и мощностей.

При электроразогреве в автобетоносмесителе симметрия электрической цепи нарушается: ни один из электродов не является и не может явиться плоскостью симметрии – при равенстве сопротивлений сторон треугольника сопротивления лучей звезды различаются между собой и при любом изменении α , когда β остается неизменным, несимметрия цепи сохраняется, одна из фаз оказывается резко перегруженной.

Решение задачи обеспечения симметричной загрузки цепи возможно в двух направлениях:

- введение в электродную схему дополнительного, нулевого, электрода, присоединенного к нейтрали (рис.1-а), что делает электрическую нагрузку симметричной относительно одного из лучей звезды и при соответствующем подборе расстояний α и β обеспечивает симметрию нагрузки всей цепи в целом. Схема с дополнительным нулевым электродом приводит схему бетоносмесителя к традиционной схеме.

- электроизоляция внутренней поверхности торцевой стенки барабана автобетоносмесителя и введение дополнительного электрода, присоединенного к первой фазе (рис.1-б), что сводит электрическую схему к треугольнику, симметричному своими сторонами, что при соответствующем подборе α и β , также как и в первом случае, обеспечивает симметрию всей цепи в целом.

При расположении электродов по первой схеме, т.е. с введением дополнительного нулевого электрода, симметричность нагрузки фаз обеспечивается при одном и только одном соотношении межэлектродных расстояний (фаза – фаза и нейтраль – фаза):

$$\beta \cdot \alpha^{-1} = 3 \quad (1)$$

В электроизолированном барабане равномерная загрузка фаз может быть осуществлена при одной и только одной транспозиции электродов

$$\beta \cdot \alpha^{-1} = 0,62 \quad (2)$$

где β – расстояние между средними электродами,
 α – между крайними и средними электродами.

К параметрам электроразогрева, которые в зависимости от характера технологической ситуации могут быть расчетными или заданными, относятся:

продолжительность разогрева, температура разогрева, площадь электродов, количество электродов и длина электродной зоны, расстояние между электродами.

Продолжительность разогрева обычно находится в пределах 10-30 мин. При продолжительности разогрева меньшей 10 минут требуется очень высокая установленная мощность и не исключена опасность недогрева зерен крупного заполнителя; при продолжительности разогрева большей 30 минут ухудшаются реологические характеристики бетонной смеси.

При разогреве в автобетоносмесителе продолжительность разогрева не может назначаться произвольно, так как помимо ограничений на величину установленной мощности, возникают ограничения на площадь электродов, кото-

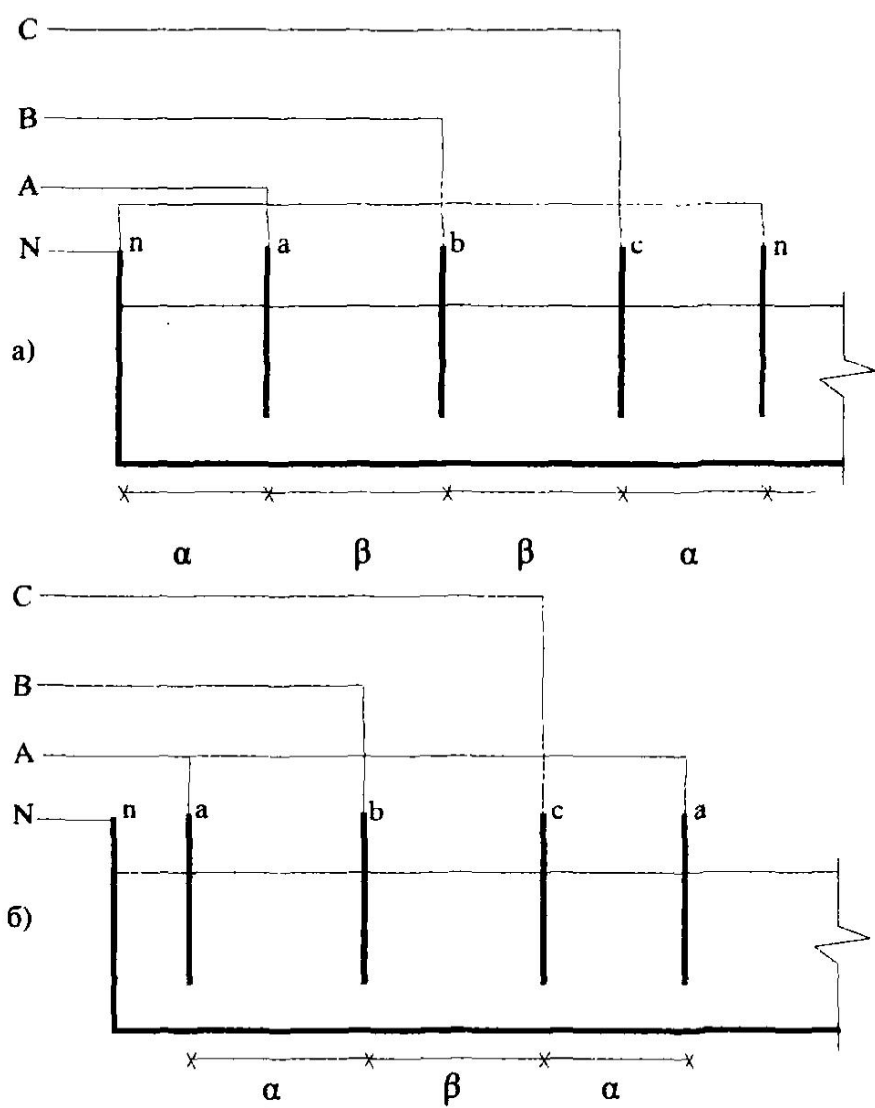


Рис. 1. Схема включения электродов и электрической цепи при равномерной нагрузке фаз:
 а) с дополнительным нулевым электродом;
 б) с изолированным корпусом и дополнительным фазовым электродом.

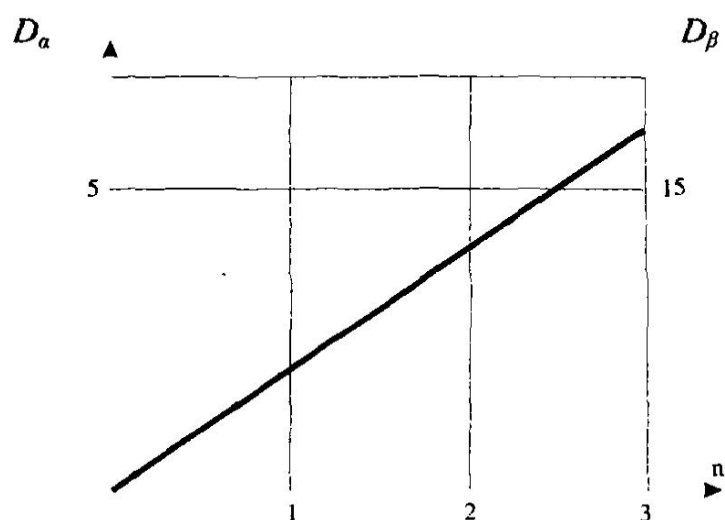


Рис. 2. График зависимости обобщенного геометрического параметра D от количества трехфазных электродных групп n .

рая не должна превышать площадь сечения свободную от лопастей автобетоносмесителя.

При известной площади электродов и установленной мощности определенный объем бетонной смеси разогревается до заданной температуры за время, зависящее от совокупности перечисленных выше известных и заданных величин.

Площадь электродов, при традиционном электроразогреве являющаяся расчетной величиной, при электроразогреве в автобетоносмесителе оказывается величиной, определяемой из конструктивных, а не из энергетических соображений. Диаметр электрода должен быть на 40-50 см меньше внутреннего диаметра лопастного оперения автобетоносмесителя и исходя из соображений транспортных габаритов вряд ли может превысить 1 м².

Количество электродов и длина электродной зоны определяются габаритами барабана автобетоносмесителя. Как при электропроводящем, так и при электроизолированном барабане количество электродов определяется формулой:

$$K = 3n + 1, \quad (3)$$

где K – количество электродов, n – количество трехфазных электродных групп.

В электропроводящем барабане электрод «+1» является нулевым электродом, присоединяемым к нейтрали; в электроизолированном барабане электрод «+1» является фазовым электродом, дублирующим первый по фазе.

В электропроводящем барабане межэлектродные расстояния определяются следующими зависимостями:

$$\alpha = 3 \cdot 10^{-3} U^2 F D_{\alpha} (\rho P)^{-1} n; \quad \beta = 3 \cdot 10^{-3} U^2 F D_{\beta} (\rho P)^{-1} n \quad (4)$$

где U – фазное напряжение, В; F – площадь электродов, м²; ρ – удельное электросопротивление бетонной смеси, Ом м; P – мощность, требующаяся для разогрева определенного объема бетонной смеси до заданной температуры и за заданное время, кВт; D_{α} и D_{β} – параметры, определяемые по графику рис.3,12; n – количество трехфазных групп.

В электроизолированном барабане межэлектродные расстояния определяются следующими зависимостями:

$$\alpha = 4,86 \cdot 10^{-3} U^2 F n (\rho P)^{-1}; \quad \beta = 3 \cdot 10^{-3} U^2 F n (\rho P)^{-1} \quad (5)$$

где U – линейное напряжение, В; n – количество трехфазных групп.

Пример расчета параметров электроразогрева бетонной смеси в автобетоносмесителе.

Задача. Требуется спроектировать электродную систему электроразогрева в барабане автобетоносмесителя СБ-92 для разогрева бетонной смеси объемом 3,5 м³. Температура бетонной смеси должна быть поднята на 50°С за 20 минут. Барабан принимается теплоизолированным, максимальная площадь электродов – 0,75 м². Удельное электросопротивление бетонной смеси $\rho = 50$ Ом м.

Решение.

1. Необходимая электрическая мощность для разогрева бетонной смеси определяется традиционным теплотехническим расчетом и с учетом десятипроцентного увеличения на нагрев барабана может быть принята $P = 420$ кВт.

2. Электродную схему принимаем состоящей из одной трехфазной группы ($n = 1$). Обобщенный геометрический параметр D определяем по графику рис. 2.

$$D_\alpha = 1,8; \quad D_\beta = 5,5$$

3. Межэлектродные расстояния определяются по (4) для электропроводного барабана

$$\alpha = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 220^2 \cdot 0,75 \cdot 1,8(5 \cdot 420)^{-1} = 10 \text{ см}$$

$$\beta = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 220^2 \cdot 0,75 \cdot 5,5(5 \cdot 420)^{-1} = 30 \text{ см}$$

и по (5) – для электроизолированного:

$$\alpha = 4,86 \cdot 10^{-3} \cdot 380^2 \cdot 0,75 \cdot 1(5 \cdot 420)^{-1} = 25 \text{ см}$$

$$\beta = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 380^2 \cdot 0,75 \cdot 1(5 \cdot 420)^{-1} = 15 \text{ см.}$$

4. Общая длина электродной зоны в первом случае составляет: $10+30+30+10 = 80$ см; во втором $25+15+25 = 65$ см.

Таким образом, для электроразогрева $3,5 \text{ м}^3$ бетонной смеси на 50°C за 20 минут требуется электродная схема, состоящая из одной трехфазной электродной группы, включающей 4 электрода площадью $0,75 \text{ м}^2$ каждый и расположенных на расстояниях 10-30-30-10 см друг от друга для схемы с нейтралью и на расстояниях 25-15-25 см для схемы без нейтрали.

Предварительный пароразогрев бетонных смесей в автобетоносмесителях

Пароразогрев бетонных смесей основан на непосредственном вводе пара в смесь при ее перемешивании. Разогрев бетонной смеси паром, поступающим в смесительный барабан, происходит за счет тепла фазового перехода, выделяющегося при конденсации пара, соприкасающегося с холодными составляющими бетонной смеси, а также со стенками и лопастями смесительного барабана. При конденсации 1 кг пара выделяется около 2250 кДж. тепла. В процессе разогрева бетонной смеси, пар, конденсируясь, не только нагревает ее, но и образует часть воды затворения. К моменту завершения приготовления бетонная смесь при максимальной структурной и температурной однородности должна иметь заданную температуру, определенное водосодержание (В/ц) и консистенцию.

Расчет энергетических параметров пароразогрева бетонной смеси в автобетоносмесителях.

Для определения оптимальных параметров пароразогрева смеси, а также способов его контроля и управления необходимо знать зависимость температуры, влажности и консистенции разогреваемой смеси от ряда факторов. Основными из них являются способ подачи пара в смеситель, его термодинамические параметры и расход, геометрические характеристики смесителя и его заполнение, начальные и конечные температуры и водосодержание смеси, интенсивность перемешивания и скорость вращения барабана смесителя.

Смешивание является одним из важнейших процессов в технологии производства бетона. Равномерность распределения исходных материалов между собой в бетоносмесителе во многом определяет физико-механические свойства затвердевшего бетона.

При изготовлении бетонной смеси необходимо равномерно распределить ее составляющие между собой, дезаэрировать смесь (так как при загрузке материалов в смеситель на 1 м³ вносится около 700 л воздуха), полностью смочить водой цементные зерна (поверхность которых в зависимости от расхода цемента и удельной поверхности может составлять 80-150 тыс. м²), а также создать оболочки из цементной пасты вокруг зерен заполнителей (поверхность заполнителей в зависимости от гранулометрического состава равна 3-40 тыс. м²).

Как малая, так и большая продолжительность смешивания снижают качество смеси и бетона. В первом случае из-за недостаточного времени смешивания не будет достигнуто равномерное распределение составляющих, во втором – из-за измельчения заполнителей, вызывающего повышение водопотребности смеси, а также из-за возможного расслоения. В связи с этим принципиальное значение имеет определение той минимальной скорости вращения барабана смесителя, которая в процессе пароразогрева обеспечит поступление в смесь требуемого для нагрева и увлажнения смеси конденсата.

Процесс перемешивания в автобетоносмесителе значительно отличается от процесса перемешивания в стационарных гравитационных смесителях, поэтому для получения бетонной смеси требуемого качества приходится руководствоваться требованиями, характерными именно для автобетоносмесителей.

Все типы автобетоносмесителей представляют собой смонтированный на автомобильном шасси (или прицепе) гравитационный реверсивный бетоносмеситель. Бетоносмесители реверсивные характеризуются тем, что лопастное оперение в них, в отличие от применяемого в стационарных бетоносмесителях, выполнено в виде двух винтовых лопастей.

Определяющими технологическими параметрами являются емкость смесительного барабана, угловая скорость его вращения и суммарное число оборотов, а также объемные соотношения емкости и готового замеса, емкости и объема загружаемых компонентов.

Одним из важных параметров смесительного барабана является объемный коэффициент заполнения, выражающий отношение объема готового замеса к геометрическому объему барабана. У стационарных гравитационных бетоносмесителей этот коэффициент составляет 0,2-0,4; это значит, что от 60 до 80% внутреннего пространства барабана используется для образования радиальных и осевых потоков, обеспечивающих требуемое перемешивание компонентов бетона при небольшой продолжительности (1-2 мин.).

У автобетоносмесителей объемный коэффициент заполнения составляет 0,5-0,6 (возить бетонную смесь, на 20-40% заполняющую объем барабана, становится экономически нецелесообразным); здесь только 40-50% пространства используется для создания потоков гравитационного перемешивания компонентов. Указанное свободное пространство относится к моменту окончания перемешивания, а при загрузке, до подачи воды в барабан, свободного пространства будет еще меньше. Например, при коэффициенте выхода (отношение суммы объемов загруженных компонентов к объему замеса), равном 0,65, свободного пространства в начале процесса будет всего 25-30%. Поэтому время на перемешивание здесь приходится увеличивать до 15-20 мин.

Для процесса перемешивания угловая скорость (или окружная скорость стенок) барабана принимается такой, чтобы компоненты бетона поднимались в верхнее пространство барабана - выше горизонтальной осевой плоскости, и оттуда падали под действием силы тяжести. В подавляющем большинстве стационарных гравитационных бетоносмесителей (здесь имеются в виду и мобильные бетоносмесители опрокидные, устанавливаемые на строительных площадках) подъем смеси и перевод ее на каскадный режим падения в основном осуществляется захватывающими смесь лопастями. В барабане автобетоносмесителя вывод смеси на каскадный режим падения осуществляется за счет трения смеси о стенки и лопасти барабана и собственной вязкости смеси. Интенсификация процесса перемешивания обеспечивается максимальной высотой падения, что достигается увеличением скорости вращения барабана. Однако скорость не должна превышать критическую, по достижении которой смесь переходит на режим центрифугирования. Критическая скорость $U_{кр}$ зависит от радиуса барабана и определяется выражением

$$U_{кр} \leq \sqrt{Rg},$$

где R — радиус барабана смесителя, м.

Для смесителя, радиус барабана которого $R = 1$ м, критическая скорость составит $U_{кр} = \sqrt{9,8 \cdot 1} \cong 3,15$ м/сек, что имеет место при скорости вращения порядка 30 об/мин. Частота вращения барабанов современных автобетоносмесителей 0-22 об/мин. Достаточно интенсивное смесеобразование, обеспечивающее получение высококачественной смеси, составляет 6-12 об/мин.

Расчет пароразогрева в автобетоносмесителе требуемого объема бетонной смеси, при заданных геометрии барабана, скорости подъема температуры (максимальной температуры разогрева и времени ее достижения) и параметрах пара: давлении и температуре — сводится к определению площадей конденсатообразующих поверхностей, возможного весового прихода конденсата за 1 мин., часовой производительности источника пара и наименьшей частоты вращения барабана смесителя, при которой обеспечивается конденсация требуемого количества пара.

Конденсатообразующими поверхностями в автобетоносмесителе являются: внутренние поверхности барабана (наклонные, вертикальные и горизонтальные), вертикальные поверхности лопастей и горизонтальная или наклонная (в процессе побуждения) поверхность бетонной смеси.

Конденсатообразующие поверхности F^1 , отнесенные к 1 пог. м длины барабана смесителя, определяются следующими зависимостями:

свободная поверхность бетонной смеси $F^1_{бет}$:

$$F^1_{бет} = 2R' \sin \frac{\varphi}{2}, \text{ м}^2 \quad (1)$$

внутренняя поверхность барабана над поверхностью бетона $F^1_{брб}$:

$$F^1_{брб} = \pi R' \left(2 - \frac{\varphi}{180}\right), \text{ м} \quad (2)$$

вертикальная поверхность лопастей, при их высоте $h_{лоп} = 0,5R'$:

$$F^1_{лоп} = 1,5\pi n' (1 - K_3) (R')^2, \text{ м} \quad (3)$$

где $K_3 = V_{бет}/V_{брб}$ - объемный коэффициент заполнения;

$h_{лоп} = 0,5R'$;

$V_{бет}$ - объем бетонной смеси, м³;

$V_{брб}$ - геометрический объем смесительного барабана, м³;

$R' = \sqrt{V_{брб} / \pi l_{брб}}$ - приведенный радиус барабана смесителя, м;

$l_{брб}$ - длина барабана смесителя, м;

n' - количество лопастей на 1 пог. м длины барабана;

φ - центральный угол, определяемый из выражения:

$$K_3 = \frac{\varphi}{360} - \frac{\sin \varphi}{2\pi} \quad (4)$$

Полная активная конденсатообразующая поверхность при частоте вращения барабана n , мин⁻¹, определяется:

$$F_{бет} = F^1 l_{брб} \cdot n \left(\frac{2\pi}{\frac{\pi\varphi}{180} + 2 \sin \frac{\varphi}{2}} \right), \text{ м}^2/\text{мин} \quad (5)$$

$$F_{брб} = F'_{брб} \cdot l_{брб} \cdot n, \text{ м}^2/\text{мин}. \quad (6)$$

$$F_{лоп} = F^1_{лоп} \cdot l_{брб} \cdot n, \text{ м}^2/\text{мин}. \quad (7)$$

В зависимости от характера ориентации конденсатообразующих поверхностей: горизонтальные с конденсацией сверху, горизонтальные с конденсацией на нижней поверхности, наклонные и вертикальные; в зависимости от степени шероховатости поверхностей и термодинамических характеристик пара, коэффициенты теплоотдачи конденсатной пленки определяются нижеследующими выражениями.

Коэффициент теплоотдачи пленки, конденсирующейся на свободной поверхности бетонной смеси $\alpha_{бет}$ с учетом ее наклона в процессе перемешивания, определяется:

$$\alpha_{бет} = k_{\beta} \lambda \cdot 14,3 \text{ Re}^{0,4} \left(\frac{t_m}{t_c} \right)^{3,8} \left(\frac{r}{c \Delta t} \right)^{0,36}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}} \quad (8)$$

где k_{β} - коэффициент, зависящий от наклона поверхности бетонной смеси при вращении барабана смесителя,

$$k_{\beta} = 1,05 - 1,1;$$

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м^{°С};

Re - критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{U_{брб} \sqrt{F}}{\nu}$$

$U_{брб}$ - окружная скорость поверхности барабана, м/с

F - поверхность теплообмена (при расчете на единицу поверхности: $F=1\text{м}^2$), м²;

ν - кинематическая вязкость теплоносителя, м²/сек;

t_m/t_c - параметрический критерий; t_m и t_c - температура мокрого и сухого термометров соответственно, °С;

$$K = \frac{r}{c \cdot \Delta t} - \text{критерий Кутателадзе};$$

r - теплота парообразования, кДж/кг;

c - теплоемкость теплоносителя, кДж/кг °С;

Δt - разность температур пара и средней температуры конденсатообразующей поверхности, °С.

Коэффициент теплоотдачи пленки, конденсирующейся на вертикальных поверхностях лопастей с учетом центробежной силы, возникающей при вращении барабана $\alpha_{лоп}$, определяется выражением:

$$\alpha_{\text{лон}} = 1,33\lambda \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{\nu}{a} \cdot \frac{K_g l^3}{\nu^2} \cdot \frac{r}{c \cdot \Delta t} \right)^{0,25} \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} \quad (9)$$

где $K_g = \left(g - \frac{U_{\text{брб}}^2}{R'} \right)$ - параметр, учитывающий затруднение скольжения

конденсатной пленки вследствие действия центробежных сил;

l - характерный размер (при расчете α на единицу поверхности $l = 1$ м), м;

ν/a - критерий Прандтля, Pr;

gt^3/ν^2 - критерий Галилея, Ga.

Коэффициент теплоотдачи пленки, конденсирующейся на нижней внутренней поверхности барабана $\alpha_{\text{брб}}$ с учетом центробежной силы определяется выражением:

$$\alpha_{\text{брб}} = 0,149 \left(\frac{\lambda_3 \cdot \rho \cdot r K g}{\nu \cdot \Delta t \cdot \sqrt{\sigma/\rho}} \right)^{0,25} \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} \quad (10)$$

где ρ - плотность, кг/м³;

σ - коэффициент поверхностного натяжения, кг/м.

Весовой приход конденсата за 1 мин. Q' составляет:

$$Q' = \frac{n\Delta t}{r} \sum F'' \alpha' \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{360} \right) = \frac{n\Delta t}{60r} (F''_{\text{бет}} \alpha'_{\text{бет}} + F''_{\text{брб}} \alpha'_{\text{брб}} + F''_{\text{лон}} \alpha'_{\text{лон}}) \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{360} \right), \text{ кг/мин} \quad (11)$$

где $F'' = F/n$;

$\alpha' = \alpha/60$ - удельная величина теплопередачи за 1 мин.

Количество пара Q'' , необходимое для разогрева заданного объема бетонной смеси, определяется теплотехническим расчетом. Ориентировочно можно принимать, что для разогрева 1м³ бетонной смеси (без теплотерь) на 1^oC расходуется примерно 1 кг пара (объемная теплоемкость бетонной смеси - 2520 кДж/м³C^o, теплота фазового перехода пара - 2250 кДж/кг).

Наименьшая скорость вращения барабана автобетоносмесителя, которая при известных и заданных условиях обеспечивает конденсацию в смесителе требуемого расчетом количества пара Q'' за время τ определяется:

$$n_{\text{min}} = \frac{60Q'' r}{\tau \Delta t} (F''_{\text{бет}} \alpha'_{\text{бет}} + F''_{\text{брб}} \alpha'_{\text{брб}} + F''_{\text{лон}} \alpha'_{\text{лон}}) \cdot \left(1 - \frac{\varphi}{360} \right) \quad (12)$$

Часовая производительность парогенератора (источника пара) Q определяется

$$Q = \frac{60Q''}{\tau} = 60Q', \text{ кг/ч} \quad (13)$$

Пароразогрев может осуществляться по следующим технологическим схемам:

- разогрев заготовленной бетонной смеси на пункте пароразогрева завода товарного бетона;

- разогрев на стройплощадке от стационарного источника пароснабжения (действующая котельная, технологический пар) или от передвижного парогенератора на специально оборудованном посту.

Расчет параметров пароразогрева в автобетоносмесителе.

Задача. Требуется рассчитать теплотехнические параметры пароразогрева бетонной смеси в автобетоносмесителе СБ-92 (геометрический объем барабана – 6 м³, объем бетонной смеси – 3,5 м³, длина барабана смесителя по оси $l_{брб} = 3,25$ м). Требуется поднять температуру бетонной смеси от 20 до 80°С за 20 минут. Параметры подводимого пара: давление $P = 1,0$ МПа, температура – 100°С. Барабан принимаем теплоизолированным, потерями тепла с поверхности барабана в ходе разогрева пренебрегаем. Количество лопастей по сечению барабана-7.

Расчет

1. Определяем объемный коэффициент заполнения барабана бетонной смесью K_3 ,

$$K_3 = \frac{V_{бет}}{V_{брб}} = \frac{3,5}{6,0} = 0,58.$$

2. Приведенный радиус барабана автобетоносмесителя

$$R' = \sqrt{\frac{V_{брб}}{\pi l_{брб}}} = \sqrt{\frac{6,0}{3,14 \cdot 3,25}} = 0,77 \text{ м.}$$

3. Определим центральный угол φ по (4)

$$0,58 = \frac{\varphi}{360} - \frac{\sin \varphi}{2\pi}$$

$$\varphi = 196^\circ.$$

4. Свободная поверхность бетонной смеси, отнесенная к 1 п.м длины барабана, определяется по (1):

$$F'_{бет} = 2R' \sin \frac{\varphi}{2} = 2 \cdot 0,77 \cdot \sin \frac{196}{2} = 1,53 \text{ м}^2.$$

Внутренняя поверхность барабана над поверхностью бетона отнесенная к 1 п.м длины барабана, определяется по (2):

$$F'_{брб} = \pi R' \left(2 - \frac{\varphi}{180}\right) = 3,14 \cdot 0,77 \left(2 - \frac{196}{180}\right) = 2,2 \text{ м}^2.$$

Вертикальная поверхность лопастей при высоте лопасти равной 0,5R'¹ отнесенная к 1 п.м длины барабана, определяется по (3):

$$F'_{лон} = 1,5\pi h' (1 - K_3) (R')^2 = 1,5 \cdot 3,14 \cdot \frac{7}{3,25} (1 - 0,58) \cdot 0,77^2 = 2,53 \text{ м}^2.$$

5. Определяем активную конденсатообразующую поверхность при частоте вращения барабана n мин⁻¹ согласно (5)÷(7):

$$F_{бет} = F'_{бет} \cdot l_{брб} \cdot n \left(\frac{2\pi}{\frac{\pi\varphi}{180} + 2 \sin \frac{\varphi}{2}} \right) = 1,53 \cdot 3,25 \cdot n \left(\frac{2 \cdot 3,14}{\frac{3,14 \cdot 196}{180} + 2 \sin \frac{196}{2}} \right) = 5,76n \text{ м}^2/\text{мин.}$$

$$F_{\text{бpb}} = F'_{\text{бpb}} \cdot l_{\text{бpb}} \cdot n = 2,2 \cdot 3,25 \cdot n = 7,15n \text{ м}^2/\text{мин.}$$

$$F_{\text{лон}} = F'_{\text{лон}} \cdot l_{\text{бpb}} \cdot n = 2,53 \cdot 3,25 \cdot n = 8,22 \cdot n \text{ м}^2/\text{мин.}$$

6. Коэффициент теплоотдачи пленки, конденсирующейся на свободной поверхности бетонной смеси, определяем по (8):

$$\alpha_{\text{бет}} = k_{\beta} \cdot \lambda \cdot 14,3 \cdot \text{Re}^{0,4} \left(\frac{t_M}{t_c} \right)^{3,8} \left(\frac{r}{c \cdot \Delta t} \right)^{0,36} = 1,1 \cdot 0,681 \cdot 14,3 \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 1}{23,7 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{70}{100} \right)^{3,8} \cdot \left(\frac{2257}{4,2 \cdot 50} \right)^{0,36} =$$

$$= 318 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C.}$$

Здесь $\lambda = 0,681 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ – коэффициент теплопроводности воды при 100°C ;

$U_{\text{бpb}} = 0,4 \text{ м/сек}$ – исходя из $U \approx nR'/10$ и при ориентировочной частоте вращения барабана в режиме побуждения $n = 5 \text{ об/мин}$;

$\nu = 23,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$ – кинематическая вязкость;

$t_M = 70$ и $t_c = 100^{\circ}\text{C}$ – температура мокрого и сухого термометров при относительной влажности $\varphi = 100\%$ и в ходе вращения барабана;

$r = 2257 \text{ кДж/кг}$ – теплота парообразования;

$c = 4,2 \text{ кДж/кг} \cdot \text{°C}$ – теплоемкость теплоносителя;

$\Delta t = 50^{\circ}\text{C}$ – разность температур пара и средней температуры смеси.

Удельный приход пара на единицу поверхности бетона $q_{\text{бет}}$ составляет:

$$q_{\text{бет}} = \alpha_{\text{бет}} \cdot \Delta t = 318 \cdot 50 = 15900 \text{ Вт/м}^2 = 25,3 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

7. Коэффициент теплоотдачи пленки, конденсирующейся на вертикальных лопастях смесителя $\alpha_{\text{лон}}$, находим по (9):

$$\alpha_{\text{лон}} = 1,33 \cdot \lambda \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{\nu}{a} \cdot \frac{k_g l^3}{\nu^2} \cdot \frac{r}{c \cdot \Delta t} \right)^{0,25} =$$

$$= 1,33 \cdot 0,681 \left[\frac{1}{4} \cdot \frac{23,7 \cdot 10^{-6}}{0,12 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{(9,8 - \frac{0,4^2}{0,77}) l^3}{(23,7 \cdot 10^{-6})^2} \cdot \frac{2257}{4,2 \cdot 50} \right]^{0,25} = 488 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C.}$$

Здесь $a = 0,12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$ – температуропроводность влажного воздуха при 100°C .

Удельный приход пара на единицу поверхности вертикальных лопастей $q_{\text{лон}}$ составит:

$$q_{\text{лон}} = \alpha_{\text{лон}} \cdot \Delta t \cdot Kt = 488 \cdot 50 \cdot 0,6 = 8784 \text{ Вт/м}^2 = 23,3 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$$

Здесь Kt – коэффициент, зависящий от степени шероховатости конденсатообразующей поверхности: при полированной гладкой поверхности $Kt=1,0$; при естественной поверхности $Kt = 0,6$.

8. Коэффициент теплоотдачи пленки, конденсирующейся на внутренней поверхности барабана $\alpha_{\text{бpb}}$ находим по (10):

$$\alpha_{\text{бpb}} = 0,149 \left(\frac{\lambda^3 \cdot \rho \cdot k_g \cdot r}{\nu \cdot \Delta t \cdot \sqrt{\sigma/\rho}} \right)^{0,25} = 0,149 \left[\frac{0,681^3 \cdot 960 \cdot (9,8 - \frac{0,4^2}{0,77}) \cdot 2257}{23,7 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot \sqrt{\frac{72 \cdot 10^{-4}}{960}}} \right]^{0,25} = 178 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$$

Здесь $\rho = 960 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды при 100°C ;

$\sigma = 72 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}$ – коэффициент поверхностного натяжения пленки конденсата.

Удельный приход пара на единицу внутренней поверхности барабана $q_{брб}$ составит:

$$q_{брб} = \alpha_{брб} \cdot \Delta t \cdot Kt = 178 \cdot 50 \cdot 0,6 = 5340 \text{ Вт/м}^2 = 8,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}.$$

9. Весовой приход конденсата ко всем конденсатообразующим поверхностям за 1 минуту определяем по (11):

$$Q' = \frac{n}{60} (F_{бет}'' \cdot q_{бет} + F_{брб}'' \cdot q_{брб} + F_{лон}'' \cdot q_{лон}) \left(1 - \frac{\varphi}{360}\right) = \\ = \frac{n}{60} (5,76 \cdot 25,3 + 7,15 \cdot 8,5 + 8,22 \cdot 23,3) \cdot \left(1 - \frac{196}{360}\right) = 3,01 \cdot n \text{ кг/мин.}$$

Предположим, что теплотехническим расчетом установлено, что для нагрева $3,5 \text{ м}^3$ бетона на 60°C с учетом сопутствующего нагрева корпуса утепленного барабана автобетоносмесителя требуется 564000 кДж или 250 кг пара. Если условием задачи установлена продолжительность разогрева 20 мин. , то минутное поступление пара должно составить $250/20 = 12,5 \text{ кг/мин}$. Такое поступление может быть обеспечено при часовой производительности парогенератора или источника пара Q не менее:

$$Q \geq \frac{250 \cdot 60}{20} \geq 750 \quad \text{кг/час}$$

и при минимальном количестве оборотов барабана автобетоносмесителя n_{\min} :

$$n_{\min} \geq \frac{12,5}{3,01} \geq 4 \text{ об/мин.}$$

Если бы условием задачи требовалось произвести разогрев за 10 мин. , то при минутном поступлении $250/10=25 \text{ кг/мин}$, минимальное количество оборотов составит:

$$n_{\min} \geq \frac{25}{3,01} \geq 8 \text{ об/мин.}$$

Барабан смесителя должен вращаться в режиме побуждения с количеством оборотов более 4 мин^{-1} (при времени разогрева 20 мин) или 8 мин^{-1} (при времени разогрева – 10 мин). При меньшей скорости и при заданной и постоянной мощности источника пара количество поступившего конденсата не обеспечит требуемой скорости подъема температуры бетона.

Конденсирующаяся в процессе разогрева вода в количестве 250 литров ($71,4 \text{ л/м}^3$) должна быть учтена при расчете количества воды затворения.

БИБЛИОГРАФИЯ

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Абрамов В.С., Амбарцумян С.А. Методы и технические средства тепловой обработки бетона на основе применения электропроводных полимеров. – М.: 1998.
2. Амбарцумян С.А., Бадеян Г.В. Щиты греющих опалубок с переменным сечением изоляционного слоя. / XXXV Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов, ЕрПИ, - 1988, - с. 30.
3. Амбарцумян С.А., Бадеян Г.В., Нуридджанян Ш.А. Анализ температурных полей при контактном нагреве монолитных бетонных и железобетонных конструкций. / Известия академии наук Арм.ССР, - 1991, - № 4, с. 175-178.
4. Амбарцумян С.А., Мартиросян А.С. Зависимость энергозатрат от коэффициента теплопередачи опалубки. / Международная конференция. Энергосбережение и охрана воздушного бассейна в системах жизнеобеспечения. ЕрАСИ, - 1992.
5. Арбенъев А.С. Бетонные и железобетонные работы. – Владимир, - ВлГУ, - 1999, - 64 с.
6. Арбенъев А.С. Возникновение и развитие технологии бетонирования с электроразогревом смеси. // Промышленный вестник № 6 и 7, - 1998, - С. 21-25.
7. Арбенъев А.С. От электротермоса к синэргобетонированию. – Владимир: ВТУ, 1996.
8. Арбенъев А.С. Синергетика электроразогревательных устройств. // Механизация строительства. - № 12, - 2000, - С. 11-12.
9. Арбенъев А.С. Создание и обработка синэнерготрона. // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - № 10, - 2004.
10. Арбенъев А.С. Четыре принципа синэргобетонирования с электроразогревом смеси. // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - № 10, - 2001, - С. 34-35.
11. Афанасьев А.А. Технологическая надежность монолитного домостроения. – ж. ПГС № 3, - 2001.
12. Афанасьев А.А., Минаков Ю.А. Оценка тепловых полей при ускоренных методах твердения бетонов в монолитном домостроении. – 7-ой Польско-российский семинар «Теоретические основы строительства», - Варшава, - 1998.
13. Афанасьев А.А., Минаков Ю.А. Термоактивная опалубка в монолитном домостроении. – ж. Стройматериалы, оборудование и технологии XXI века № 7 и 8, - 1999.
14. Баталов В.С. Теоретические основы вибротермической технологии монолитного бетона. – Магнитогорск: МГМА, 1998.
15. Беккер Л.Н., Трембицкий С.М. Ресурсосберегающие тепловые методы ускорения твердения бетона при монолитном строительстве в зимнее время. – Спецжурнал «Энергосбережение», № 5, 2000.

16. Вегенер Р.В. Электроразогрев бетонных и железобетонных конструкций. – Госстройиздат, - 1953.
17. Витько С.Д., Толстых А.А., Козак Г.Д. Опыт бетонирования с применением термоактивных опалубочных щитов. / Повышение качества строительства зданий и сооружений в зимних условиях. – М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1987, - С. 67-69.
18. Временные указания по периферийному электроразогреву бетона (ВСН-60-70), - М.: Мосоргстрой, - 1972, - 86 с.
19. Временные указания по электроразогреву бетонной смеси (ВСН-22-26). – М.: Мосоргстрой, 1967, - 14 с.
20. Ганин В.П. Электрическое сопротивление бетона в зависимости от его состава. – ж. Бетон и железобетон № 10, - 1964.
21. Гендин В.Я. Электропрогрев в производстве сборных железобетонных изделий и блоков. – М.: Госстройиздат, - 1961.
22. Гендин В.Я., Мягков А.Д. Электропрогрев бетона с противоморозными добавками / Рекомендации по производству бетонных работ в зимнее время. – Новосибирск: Западно-Сибирское книжное изд-во, - 1979, - С. 42-44.
23. Головнев С.Г. Материалы и технологии, обеспечивающие эффективность возведения зданий из монолитного бетона зимой. – Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: Материалы второй международной научно-практической конференции / Ростов-на-Дону, 2002.
24. Головнев С.Г. Оптимизация методов зимнего бетонирования. – Л.: Стройиздат, 1983.
25. Головнев С.Г. Параметры технологии и качество зимнего бетонирования. – Изд-во : Известия вузов. Строительство, № 5-6, 1995.
26. Головнев С.Г., Алабугин А.Н., Юнусов Н.В. Раннее нагружение уложенного в зимнее время бетона. – Бетон и железобетон, № 12, 1985.
27. Головнев С.Г., Барский И.Э., Новиков Ю.М. Прогрев бетона в стыках железобетонных конструкций ТЭФ с применением трубчатых нагревателей. - Изд-во: Энергетическое строительство, 1968, № 5.
28. Головнев С.Г., Вальт А.Б., Гольденберг М.М. Способ расчета средней температуры бетона при охлаждении конструкций. – Изд-во : Известия вузов. Строительство и архитектура, № 10, 1986.
29. Головнев С.Г., Капранов В.В., Юнусов Н.В., Валеев А.Х. Зимнее бетонирование на Южном Урале. - Южно-Уральское книжное изд-во, Челябинск, 1974.
30. Головнев С.Г., Юнусов Н.В., Бланк Л.И. Экономическое обоснование выбора способа зимнего бетонирования. - В кн.: Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера.- М., 1982.
31. Даилов Н.И. Тепловая обработка сборного железобетона инфракрасными лучами. – Тр. РИЛЕМ, - Стройиздат, - 1968.
32. Заседателев И.Б., Мишин Г.В. Теплопроводность твердеющих растворов и бетонов. – ж. Бетон и железобетон № 10, - 1969.

33. Заседателев И.Б., Петров-Денисов В.Г. Тепло- и массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений. – М.: Стройиздат, -1973,-168с.
34. Колчеданцев Л.М. Интенсифицированная технология бетонных работ на основе термовиброобработки смесей. – С.-Петербург, - 2001.
35. Колчеданцев Л.М. Интенсифицированная технология бетонирования среднemasивных конструкций // Электромонтажные и специальные работы в строительстве. – 1998. - № 4.
36. Красновский Б.М. Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования. – М.: ГАСИС, - 2004, - 475 с.
37. Крылов Б.А. Возведение монолитных конструкций. – сб. «НИИЖБ 75 лет в строительстве», - М. – 2002.
38. Крылов Б.А. Эффективное ресурсосбережение. – М.: Знание, - 1989.
39. Крылов Б.А., Арбеньев А.С. Остывание бетона на морозе. // Бетон и железобетон. - № 5, - 1993, - С. 22-24.
40. Крылов Б.А., Ли А.И. Механизм воздействия форсированного подъема температуры на физико-механические процессы в бетоне при электроразогреве // Вопросы общей технологии и ускорения твердения бетонов. – М.: Стройиздат, 1970.
41. Крылов Б.А., Ли А.И. Форсированный электроразогрев бетона. – М.: Стройиздат, - 1975.
42. Лысов В.П. Полимерный провод в греющих полах и устройствах. – НП ООО «Стринко». – Минск, 1999. – 124 с.
43. Лысов В.П. Формирование ресурсосберегающих организационных решений возведения монолитных конструкций и сооружений из бетона. – Учебное пособие. – Белорусский политехнический институт. – Минск, 1986. – 96 с.
44. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. – М.: Госстройиздат, - 1974.
45. Проектирование технологии термообработки бетона с использованием методов контактного электрообогрева. – Учебно-методическое пособие для студентов специальности «Промышленное и гражданское строительство» (1-700201). Изд-во: Белорусский национальный технический университет. (Под редакцией профессора Лысова В.П.), Минск, 2004. – 56 с.
46. Рекомендации по применению в зимних условиях бетонных смесей, предварительно разогретых электрическим током. – НИИЖБ, М., Стройиздат, 1969.
47. Рекомендации по производству работ в зимних условиях с использованием полимерного греющего провода. – (Лысов В.П., Гусева И.В., Минеев Р.А.). Изд-во: Белорусская государственная политехническая академия. – Минск, 1995. – 26 с.
48. Рекомендации по электрообогреву монолитного бетона и железобетона нагревательными проводами. – М.: ЦНИИОМТП, - 1989, - 68 с.

49. Руководство по омоноличиванию стыков каркасных зданий рамно-безригельной конструкции при круглогодичном строительстве. – М., ОАО ЦНИИС, 1997. – 115 с.

50. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, в районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера. – М.: Стройиздат, 1982, - 313.

51. Руководство по электропрогреву бетонных и железобетонных конструкций и изделий. – М.: Стройиздат, - 1964, - 185 с.

52. Руководство по электротермообработке бетона. – М.: Стройиздат, 1974, - 225 с.

53. Руководство по зимнему бетонированию с применением метода термоса. – М.: Стройиздат, 1975, - 192 с.

54. Руководство по конструкциям опалубки и производству опалубочных работ. – М.: Стройиздат, - 1983, - 501 с.

55. Руководство по применению опалубки для железобетонных конструкций. Скользящая и объемно-переставная опалубка. – М.: Стройиздат, 1974, - вып. 2, - 80 с.

56. Сагайдак А.И. Организация контроля качества железобетонных конструкций. – Железобетон в XXI веке. Состояние и перспективы развития бетонов и железобетона в России. / НИИЖБ, - М.: Готика, - 2001.

57. Сагайдак А.И., Несвижский Э.Г. Основные направления применения акустодиагностики для контроля качества бетона в конструкциях и сооружениях. // Материалы XXIII Международной конференции в области бетона и железобетона, - М.: Стройиздат, - 1991, - С. 315-316.

58. Савалов И.Г., Топчий В.Д., Поспелов М.Б. Инвентарная опалубка для зимнего бетонирования. / Совершенствование методов бетонирования монолитных конструкций зданий и сооружений, в т.ч. в зимних условиях. - Красноярск: Стройиздат, - 1971, - сб. 2, вып. 1, - С. 151-159.

59. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А. и др. Руководство по омоноличиванию стыков каркасных зданий рамно-безригельной конструкции при круглогодичном строительстве. – М.: ОАО ЦНИИС, - 1997, - 115 с.

60. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А., Куракин П.П. Опыт зимнего бетонирования плит проезжей части сталежелезобетонных пролетных строений. // Технология и качество возводимых конструкций из монолитного бетона. Научные труды ОАО ЦНИИС. Вып. 217, стр. 172-179, - М.: ОАО ЦНИИС, - 2003.

61. Строительные нормы и правила. СНиП III.15-76. Бетонные и железобетонные конструкции монолитные. Правила производства и приемки работ. – М.: Стройиздат, - 1977, - 127 с.

62. Строительные нормы и правила. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции: основные положения. – М.: Стройиздат, - 2004.

63. Топчий В.Д. Бетонирование в термоактивной опалубке. – М., Стройиздат, 1977.

64. Трембицкий С.М. Графоаналитический метод оценки электрических параметров индукционных установок для термообработки бетона. – Научно-

технический реферативный сборник «Электротехническая промышленность, электротермия» № 1 (251), - М., - 1984.

65. Трембицкий С.М. Методы и технические решения энергосберегающей технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций. – М.: Бетон и железобетон № 6, - 2004.

66. Трембицкий С.М. Энерго- и ресурсосбережение в заводской и строительной технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций. – М.: ОАО «Издательство «Стройиздат», - 2004.

67. Шифрин С.А. Практика применения греющего провода в технологии возведения транспортных сооружений // Технологии и качество возводимых конструкций из монолитного бетона. Научные труды ОАО ЦНИИС, Вып. 217. стр. 216-221. – М., ОАО ЦНИИС, - 2003.

68. International Symposium «Proceedings Cold regions Engineering». – Harbin, - China, - 1996, - 328 p.

69. Krylov Boris A. Cold Weather Concreting. – USA, - CRC Press LLC, - 1998, - 227 p.

70. Krylov B.A. and Zvezdov A.I. Temperature Influence on Concrete Structures and Its Hardenings. / International Symposium in Japan E&FN Spook. – 1995, - Wolum Two, - 917-925 p.

71. RILEM 67, Recommendation for concreting in cold Weather, - Finland, - ESPOO, - 1988.