

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

И. Б. КУЗЬМИН

**СИНЕРГОБЕТОНИРОВАНИЕ
МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПАРОРАЗОГРЕТЫМИ
В АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЯХ
СМЕСЯМИ**

Монография

Владимир 2011

УДК 693.547.34

ББК 38.626

К89

Рецензенты:

Доктор, инженер, доцент кафедры
технологии и механизации строительства
Университета архитектуры, строительства и геодезии
г. Софии (Болгария)
Б. Велев

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой
химической технологии стекла и керамики
Владимирского государственного университета
А.И.Христофоров

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Кузьмин, И. Б.

К89 Синергобетонирование монолитных конструкций пароразогре-
тыми в автобетоносмесителях смесями : монография / И. Б. Кузьмин ;
Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2011. – 248 с.
ISBN 978-5-9984-0130-5

Включает теорию метода бетонирования монолитных конструкций пароразогре-
тыми в автобетоносмесителях смесями и практические рекомендации организации
строительного производства по возведению зданий и сооружений, в том числе в экс-
тремальных условиях.

Предназначена для научных работников, инженерно-технических сотрудников
строительных организаций, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов
строительных специальностей учебных заведений.

Рекомендована для формирования профессиональных компетенций в соответст-
вии с ФГОС 3-го поколения.

Ил. 67. Табл. 22. Библиогр.: 212 назв.

УДК 693.547.34

ББК 38.626

ISBN 978-5-9984-0130-5

© И. Б. Кузьмин, 2011

© Владимирский государственный
университет, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ БЕТОНИРОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЬ – АВТОБЕТОНОНАСОС..... | 9 |
| § 1.1. Конструктивные особенности машин-автобетоносмесителей и автобетононасосов..... | 9 |
| § 1.2. Применение автобетоносмесителей и автобетононасосов в составе агрегатов – технологических комплексов для приготовления и транспортирования бетонной смеси..... | 14 |
| § 1.3. Процессы, происходящие при бетонировании монолитных конструкций с использованием автобетоносмесителей и автобетононасосов..... | 15 |
| § 1.4. Организация производства с использованием технологических комплексов автобетоносмеситель – автобетононасос..... | 37 |
| § 1.5. Расширение технологических возможностей применения автобетоносмесителей..... | 38 |
| Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИГОТОВЛЕНИЯ, ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ, ПОДАЧИ И УКЛАДКИ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЬ – АВТОБЕТОНОНАСОС..... | 42 |
| § 2.1. Приготовление и транспортирование бетонных смесей в автобетоносмесителе..... | 42 |
| § 2.2. Транспортирование, подача и укладка бетонных смесей автобетононасосом..... | 48 |
| § 2.3. Технологические комплексы автобетоносмеситель – автобетононасос..... | 56 |
| § 2.4. Особенности использования автобетоносмесителей и автобетононасосов при отрицательной температуре наружного воздуха..... | 58 |
| § 2.5. Организация производства..... | 64 |
| Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРИГОТОВЛЕНИИ БЕТОННОЙ СМЕСИ В СМЕСИТЕЛЬНОМ БАРАБАНЕ АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЯ..... | 78 |
| § 3.1. Исследование процессов, происходящих при приготовлении бетонной смеси в смесительном барабане | 78 |
| § 3.2. Исследование однородности пароразогретой бетонной смеси, приготавливаемой в смесительном барабане..... | 84 |

| | |
|---|------------|
| § 3.3. Исследование водопотребности компонентов бетонной смеси при пароразогре..... | 99 |
| Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРОРАЗОГРЕВА БЕТОННОЙ СМЕСИ НА ЕЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА..... | 105 |
| § 4.1. Исследование технологических свойств пароразогретой в смесительном барабане бетонной смеси..... | 105 |
| § 4.2. Влияние пароразогрева на структурообразование бетона..... | 110 |
| Глава 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЬ – АВТОБЕТОНОНАСОС..... | 121 |
| § 5.1. Исследование тепломассообменных процессов при пароразогреве бетонной смеси в автобетоносмесителях.... | 121 |
| § 5.2. Тепло- и массообменные процессы, происходящие при транспортировании пароразогретой смеси..... | 135 |
| § 5.3. Исследование теплового и термонапряженного состояния бетона из пароразогретой бетонной смеси в конструкции..... | 144 |
| Глава 6. РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНИРОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПАРОРАЗОГРЕТЫМИ В АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЯХ СМЕСЯМИ..... | 173 |
| § 6.1. Методика назначения технологических параметров производства бетона из пароразогретой смеси..... | 173 |
| § 6.2. Технологический процесс производства бетонных работ пароразогретой в автобетоносмесителе смесью..... | 180 |
| § 6.3. Области применения и технико-экономические показатели разработанной технологии..... | 188 |
| § 6.4. Методика расчета энергозатрат при применении пароразогретых смесей..... | 208 |
| Глава 7. АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ..... | 217 |
| § 7.1. Первые производственные испытания технологии возведения монолитных конструкций из тяжелого бетона на объектах промышленного строительства Владимирской области..... | 217 |
| § 7.2. Производственные испытания технологии возведения монолитных конструкций из тяжелого бетона на объектах специального строительства Кемеровской области..... | 223 |
| § 7.3. Применение технологии в монолитном домостроении..... | 229 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 231 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 232 |

ВВЕДЕНИЕ

Впервые в мире технология синергобетонирования монолитных конструкций бетонными смесями, разогретыми паром в смесительном барабане автобетоносмесителя (АБС), была применена автором в октябре 1980 года при возведении фундаментов котельной животноводческого комплекса во Владимирской области. Тем самым было положено начало применению новой технологии, базирующейся на фундаментальных законах и принципах синергетики, позволившей максимально сократить время возведения монолитных конструкций и перейти к круглогодичной организации производства с суточным оборотом опалубки.

Разработка и внедрение технологии синергобетонирования монолитных конструкций пароразогретыми в АБС смесями основывались на законах, открытых Р. Майером, О. Хевисайдом, А. Эйнштейном, Я. ван дер Вальсом, С. Аррениусом, В. Оствальдом, К. Гульдбергом, П. Вааге, Я. Вант-Гоффом, Д. Гиббсом, Р. Клаузиусом, Ж. Фурье, Л. Онсагером, Г. Галилеем, Г. Гельмгольцем, Р. Гуком, И. Ньютоном, И. Пригожиным и другими.

Сущность технологии заключается в том, что для получения бетона максимальной прочности в бетонную смесь на разных этапах ее приготовления, транспортирования, подачи и укладки вносится максимальное количество энергии, выступающей в разных видах при одновременном согласовании, и осуществляется последующее сохранение ее для структурообразования бетона.

Со времен Древней Греции (триада Платона) и в наши дни (синергетика И.Р. Пригожина) известно, что получение максимальной прочности возможно при осуществлении предварительного разъединения и последующего соединения. Другими словами, для того чтобы вещество полностью усвоило энергию и стало прочнее, необходимо сначала предельно разъединить его на частицы, молекулы, ионы, а после этого – соединять и упрочнять продукты реакции.

Это в полной мере относится и к синтезу бетона. На первом этапе – разъединении, – необходимо добиться максимального увеличения поверхности реагирующих веществ. Сразу после затворения происходит интенсивная диссоциация с диспергацией зерен цемента, и в это время надо обеспечить наиболее полное растворение, не допуская и отдаляя процессы гидратации. Одновременное и согласованное применение разных видов воздействий способствует более полному разъединению, разрушая малопрочные образования.

На второй стадии происходит основная гидратация. Реакции начнутся на поверхности зерен цемента, на которых образуются малопроницаемые оболочки. В этот период внесенная ранее и сохраненная энергия направляется на углубление и ускорение процесса гидратации вокруг каждого зерна цемента, поэтому на данном этапе необходимо оградить бетонную смесь от дополнительных внешних воздействий.

На третьей стадии формируется каркас из выпадающих кристаллов и происходит его обрастание. В этот период сохраненная ранее энергия направляется на создание прочной структуры бетона, в том числе и за счет экзотермии, поэтому энергообмен с окружающей средой должен осуществляться через постепенное остывание бетона в конструкции.

Проанализировав все имеющиеся виды энергоносителей и средства, в которых они могут быть применены, можно сказать, что наиболее полно удовлетворяющими всем приведенным выше положениям на современном этапе являются пар и АБС.

В зависимости от регламентирующих критериев, таких как минимальные затраты энергии, простота, универсальность, минимальное время производства работ и пр., максимальные результаты при применении технологии достигались при использовании целого ряда законов фундаментальных наук. От многих понятий, формул, методик, принципов расчетов и прочего пришлось отказаться, так как они не соответствовали законам и реально получаемым результатам. Такие основополагающие понятия, существующие в бетоноведении, как подбор составов бетонов, водоцементное отношение, осадка конуса, вибрирование, измерение прочности по испытаниям кубиков и другие не могли быть применены в отношении пароразогретых смесей.

Используя АБС в качестве технологического элемента, удалось добиться повышения прочности бетона за счет применения механической и термомеханической активации компонентов бетонной смеси путем переменного или постоянного вращения смесительного барабана АБС. Эксперименты показали, что площадь контактов увеличивается при смешивании вследствие удаления с поверхности компонентов загрязненных частиц, а также при дроблении заполнителей (сухой и мокрый домол). Особенно этот фактор значим при минимальном содержании влаги в компонентах бетонной смеси.

Загрузка компонентов бетонной смеси с ограниченным количеством воды в смесительный барабан АБС, особенно при отрицательной температуре наружного воздуха, последующая доставка их на сколь угодно неограниченное расстояние к пункту разогрева и разогрев бетонной смеси паром позволяют реализовать в рамках данной технологии один из основных

законов химической кинетики – закон действующих масс К. Гульдберга и П. Вааге. Внесение энергии происходит до начала схватывания в момент наибольшей концентрации реагирующих веществ. Разогрев компонентов бетонной смеси в утепленном смесительном барабане АБС целесообразно производить влажным насыщенным паром в связи с его низкой вязкостью и высокой проникающей способностью и теплоотдачей. Известно, что вязкость воды при 80 °С составляет третью часть вязкости воды при 20 °С. Вязкость пара при температурах 100 – 120 °С в 80 раз меньше вязкости воды при 20 °С. Указанные свойства пара характеризуют его как идеального влаго- и теплоносителя, использование которого улучшает гомогенизацию смеси. Высокая проникающая способность пара способствует также более быстрому, чем при других способах, нагреву компонентов бетонной смеси. Пар, вступая в контакт с относительно холодными поверхностями компонентов бетонной смеси и внутренней поверхностью смесительного барабана, интенсивно конденсируется, высвобождая теплоту парообразования фазового перехода пара в воду, которая идет на увеличение влаго- и теплосодержания бетонной смеси, а также теплосодержания корпуса смесительного барабана АБС. При конденсации 1 кг пара в зависимости от давления, при котором происходит конденсация, выделяется 2048 - 2257 кДж.

Происходящее в смесительном барабане АБС одновременное смешивание бетонной смеси и поступление пара с высокой скоростью значительно ускоряют процесс теплообмена. Взаимное трение частиц и кинетическая энергия потока пара уменьшают толщину пленки конденсата и изменяют ее течение, переводя его в состояние волнового и турбулентного, при котором коэффициент теплоотдачи возрастает. При пароразогреве элементарные объемы бетонной смеси проходят многократно через зону действия струи пара, при этом они разогреваются до температуры, близкой к температуре теплоносителя, выходя из зоны действия струи пара, эти частицы быстро охлаждаются. Такие температурные перепады в сочетании с пониженной вязкостью воды и повышенной проникаемостью пара приводят к разрушению первично образовавшихся флоккул цементных частиц. Эффективный радиус частиц уменьшается с 55 (холодных) до 37 мк (пароразогретых). Таким образом, процесс пароразогрева приводит к диспергации. Кроме того, попадая в струю пара, более легкие частицы цемента и мелкого заполнителя торкретируют поверхность более крупного заполнителя и тем самым сдирают пленку конденсата. Наиболее благоприятные условия теплообмена складываются в начале процесса нагревания в связи с относительно малой толщиной пленки

конденсата. В этот период, когда бетонная смесь еще достаточно суха, происходит упругое столкновение частиц, что уменьшает толщину пленки. По мере увлажнения смеси действие упругих сил уменьшается, что приводит к увеличению толщины пленки конденсата.

Термохимические воздействия, осуществленные в период наибольшей концентрации реагирующих веществ, максимально интенсифицируют реакции в бетонной смеси. Согласно закону Я. Вант-Гоффа повышение температуры теплоносителя до парообразования способствует максимальной проникающей способности и многократно увеличивает скорость процесса диссоциации.

С учетом комплексного критерия, наиболее эффективной температурой разогрева бетонной смеси можно считать 55 - 65 °С. До этих температур теплопередача от пара к компонентам бетонной смеси идет наиболее интенсивно, подвижность бетонной смеси максимальна и достаточно продолжительна по времени для подачи и укладки ее в опалубку, экзотермия оптимальна, теплоотвод в опалубке осуществляется по наиболее «мягкому» режиму, получаемая прочность бетона максимальна. Все это благоприятно сказывается как на улучшении технологических свойств бетонной смеси, так и на увеличении физико-механических характеристик бетона. При более высоких температурах отделяется адсорбционная вода, образуется этtringит, поглощающий воду, а также повышается испарение, - все это резко замедляет диффузионные процессы.

Таким образом, синергетический эффект, получаемый от разных видов воздействий, в результате интенсивного одновременного и согласованного внесения разных видов энергии приводит к цепным реакциям и высокой упорядоченности системы. Плотная структура создается с наиболее полным сохранением и усвоением внесенной энергии. Это достигается постепенным остыванием, постоянным теплотоком и естественным выдерживанием бетона.

Применение технологии бетонирования монолитных конструкций пароразогретыми в АБС смесями, осуществленное в России и за рубежом, доказало правоту выдвинутых и реализованных теоретических положений, взятых за основу при разработке новых приемов и способов ведения строительных работ.

Реализация научных принципов технологии была бы невозможна без участия широкого круга специалистов, и особую благодарность хотелось бы выразить всем строителям – производственникам, от рабочих до управляющих трестами, которые принимали личное участие или содействовали внедрению технологии.

Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ БЕТОНИРОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЬ – АВТОБЕТОНОНАСОС

§ 1.1. Конструктивные особенности машин- автобетоносмесителей и автобетононасосов

АБС предназначены для доставки отдозированных компонентов бетонной смеси, ее приготовления (подвижной и малоподвижной) в пути следования или по прибытии на строительный объект, доставки готовой бетонной смеси и выдачи ее потребителю.

АБС с технологической точки зрения – наиболее совершенный вид специализированного транспорта для перевозки бетонной смеси. Они особенно эффективны в условиях рассредоточенного строительства при доставке сухой бетонной смеси на объекты, удаленные от районного бетонного завода на расстояния, превышающие технологически допустимые для товарных бетонных смесей, что позволяет отказаться от сооружения приобъектных бетоносмесительных установок [1, 2, 3, 4, 5].

Первый проект передвижного смесителя, установленного на шасси грузовика, разработал С. Стефаниан из Колумбуса в 1916 году, и уже в 1920-х годах в США появились первые АБС.

В нашей стране АБС впервые были применены в системе Главмосинжстроя, а начиная с 1968 года АБС марки С-1036 стали серийно выпускаться Славянским заводом строительных машин.

Впоследствии отечественная промышленность выпускала две модели АБС, которые нашли широкое применение: С-1036Б (СБ-69Б) на базе автомобиля МАЗ-503А и СБ-92 на базе автомобиля КраЗ-258 (СБ-92-І) и на базе автомобиля КамАЗ-5511 (СБ-92-ІА). С вводом в эксплуатацию завода строительных машин в г. Туймазы Башкирской республики годовой мощностью 2000 АБС номенклатура их расширилась: 1000 – с барабаном 3 м³, 500 – 6 м³, 400 – 8 м³, 100 – 10 м³.

Все эксплуатирующиеся АБС представляют собой смонтированное на раме смесительное оборудование, закрепленное на лонжеронах шасси базового автомобиля. К основным узлам технологического оборудования АБС относятся: смесительный барабан, привод смесительного барабана, загрузочно-разгрузочное устройство, устройство для подачи воды в смесительный барабан и система управления смесителем [6].

Смесительный барабан, являясь рабочим органом машины, выполняет несколько функций: прием компонентов бетонной смеси и быстрое направление их внутрь барабана, перемешивание с целью получения однородной бетонной смеси с побуждением ее в пути следования машины, разгрузку смеси через горловину барабана на лоток. Смесительный барабан выполняют в виде сварной цилиндроконической емкости грушевидной формы и устанавливают с углом наклона оси барабана к горизонту 15° .

Передняя часть барабана, обращенная к кабине водителя, - днище, в середину которого вварена опорная цапфа. В корпусе головной опоры установлен сдвоенный конический подшипник, воспринимающий радиальные и аксиальные усилия. Двумя остальными точками опоры служат ролики, на которые опирается барабан через бандаж на задней конической обечайке.

На днище барабана закреплена ведомая звездочка цепной передачи. В передней части рамы технологического оборудования приварена стойка, в которой закреплен опорный подшипник смесительного барабана. Задняя часть барабана (горловина) изнутри представляет собой два противоположных лотка, образованных двумя винтовыми лопастями.

Лопастное устройство смесительного барабана, выполненное в виде двух винтовых лопастей плоского профиля, создает интенсивные радиальные и осевые потоки компонентов смеси в процессе смешивания и обеспечивает быстрое опорожнение барабана при обратном вращении. Для более быстрого перемешивания и разгрузки винтовые лопасти установлены в барабане перпендикулярно к его коническим поверхностям.

Смесительные барабаны АБС имеют индивидуальные тракторные дизельные двигатели. Подбор их ведется из расчета 10 – 15 л.с. на 1 м^3 замеса. Кроме двигателя, в состав привода смесительного барабана входят муфта сцепления, реверсивный редуктор, карданные валы и цепная передача.

Загрузочно-разгрузочное устройство крепится к задним стойкам рамы шасси. Загрузка компонентов бетонной смеси производится через загрузочный лоток в горловину вращающегося смесительного барабана. Разгрузка АБС ведется при обратном вращении барабана через загрузочно-разгрузочное отверстие. Разгрузочный лоток выполнен из двух складывающихся лотков (третий – запасной – служит для удлинения лотка), подвешен на шарнирах и может двигаться в разные стороны и вверх-вниз, увеличивая распределение смеси как по горизонтали, так и по высоте.

Технологическая вода затворения подается в смесительный барабан непосредственно перед приготовлением смеси. В систему подачи воды входит цилиндрический бак, центробежный насос, дозатор воды и водопровод. В смесительный барабан вода подается через патрубок. Дозирование воды осуществляется по счетчику-водомеру, установленному на водяном баке, и контролируется визуально по водомерному стеклу.

Управление вращением смесительного барабана осуществляется с помощью рычагов, которые расположены у разгрузочного устройства. Это позволяет вести визуальное наблюдение за операциями загрузки и разгрузки АБС. Кроме того, в систему управления смесительным барабаном входят датчики контроля работы двигателя барабана. В общую систему управления процессом приготовления бетонной смеси входит и управление водяным насосом [6].

Отечественной промышленностью освоен выпуск ряда марок АБС, основными из которых являются СБ и АБС с модификациями [7].

В последние десятилетия в России и за рубежом все большее распространение получает транспортирование бетонной смеси по трубам с использованием автобетононасосов (АБН). Трубопроводный транспорт с успехом используется при перемещении бетонной смеси на строительной площадке как с малым, так и с большим объемом бетонных работ в тех случаях, где невозможна подача смеси автотранспортом, строительными кранами, в подземных и других видах строительства.

При транспортировании бетонной смеси по трубам резко снижается трудоёмкость процесса, освобождается дефицитное время дорогостоящих монтажных кранов. Применение бетононасосов – один из наиболее прогрессивных методов механизации подачи и укладки бетонной смеси, повышающий качество и эффективность бетонных работ при возведении самых разнообразных монолитных конструкций в различных видах строительства.

Впервые бетононасос был предложен в 1913 году С. Корнелем и М. Ки (США) [1], получившими патент на машину, оказавшуюся из-за отдельных конструктивных ошибок неработоспособной. Начало промышленного производства бетононасосов относится к концу 1920-х годов. Первый бетононасос по патенту М. Гизе и Ф. Хелля был изготовлен фирмой «Торкрет» (Германия). При испытаниях этого насоса на строительстве в 1929 году, несмотря на ряд конструктивных недостатков и поломок машины, удалось подавать смесь на высоту 27 м при производительности

10 м³/ч. Впоследствии был освоен выпуск мобильных бетононасосов, монтируемых сначала на прицепе, а затем на двух- или трехосных шасси. Новые возможности использования бетононасосов открылись с появлением целого семейства машин, оснащенных манипулятором бетоновода.

В СССР, начиная с 1950 года, был выпущен ряд моделей бетононасосов производительностью от 5 до 40 м³/ч, наиболее успешно применявшиеся на стройках, которые вели Череповецметаллургстрой и Магнитострой. В 1979 году Минтяжстрой совместно с Минэнерго освоили выпуск мобильного бетононасоса модели БН-80-20 по лицензии фирмы «SHETTER» (ФРГ) производительностью 80 м³/ч.

АБН БН-80-20 был предназначен для приема свежеприготовленной бетонной смеси от специализированных средств и подачи ее к месту укладки. Его использовали при возведении зданий и сооружений из монолитного бетона и железобетона. Объёмная подача АБН была четырехступенчатой (9, 15, 30, 60 м³/ч), вылет стрелы – до 20 м.

АБН БН-80-20 представлял собой автотранспортное средство, оснащенное бетононасосом с гидрооборудованием, распределительной стрелой и выносными опорами, смонтированными на шасси автомобиля КраЗ-257. Шасси автомобиля было дополнительно оснащено коробкой отбора мощности (КОМ) для привода гидравлической насосной станции бетононасоса и регулятором частоты вращения двигателя с дистанционным управлением.

В состав бетононасоса входили блок рабочих и бетонотранспортных (нагнетающих) цилиндров с электрогидравлическим блоком управления, шиберное устройство с загрузочным бункером и мешалкой, система промывки.

Вскоре отечественная промышленность стала выпускать мобильный бетононасос СБ-126 на базе КаМАЗ-53213, оснащенный манипулятором бетоновода с вылетом стрелы 18 м.

Широкое распространение получил серийно производимый АБН СБ-126А с гидравлическим приводом, предназначенный для подачи готовой смеси в горизонтальном и вертикальном направлениях к месту укладки с помощью стрелы или инвентарного бетоновода при возведении монолитных конструкций. АБН СБ-126А был предназначен для работы в условиях умеренного климата.

АБН состоит из шасси автомобиля, рамы, распределительной стрелы с бетоноводом, цилиндропоршневой группы, гидросистемы, блока управ-

ления, пункта контроля и управления, опор, компрессорной установки, ёмкости для воды и загрузочной воронки.

Бетонная смесь из АБС подается на загрузочную воронку АБН, где она дополнительно смешивается, и направляется лопастным смесителем к распределительному устройству и отверстиям двух бетонотранспортных цилиндров. При соответствующем крайнем положении распределительного устройства один бетонотранспортный цилиндр сообщается с загрузочной воронкой и бетонная смесь поступает в него, другой цилиндр сообщается с помощью распределительного устройства с напорным бетоноводом, а находящаяся в бетонотранспортном цилиндре бетонная смесь нагнетается поршнем в бетоновод. В конце хода нагнетания автоматически переключается ход рабочих гидроцилиндров и одновременно изменяется положение распределительного устройства, благодаря чему первый бетонотранспортный цилиндр сообщается с бетоноводом для нагнетания в него бетонной смеси, а второй - с загрузочной воронкой для всасывания смеси. Такие циклы переключения происходят при каждом ходе рабочих гидроцилиндров [8].

Всего же в СССР выпускалось несколько моделей бетононасосов, смонтированных на прицепе или шасси автомобиля, что позволяло использовать их на нескольких объектах в одну смену. Бетононасосы работали как от отдельного двигателя внутреннего сгорания, так и от двигателя автомобиля, что позволяло использовать их в районах, где нет энергоснабжения.

Дальнейшее повышение эффективности использования бетононасосов связано с применением манипуляторов. Монтаж манипулятора на бетононасосе, установленном на автомобильном ходу, позволяет подавать и укладывать смесь вверх, вниз и в сторону по радиусу, по горизонтали до 20 – 25 м без монтажа бетоновода, что значительно снижает трудоёмкость и облегчает условия укладки бетонной смеси.

В СССР производилась автономная распределительная стрела СБ-129 (манипулятор), предназначенная для укладки бетона в места, находящиеся на расстоянии 12-15 м от АБН.

Манипулятор состоял из опорной и поворотной рам, выносных опор, гидропривода, механизма поворота, стрелы с бетоноводом и противовеса. Гидропривод был выполнен с разомкнутой циркуляцией рабочей жидкости, аксиально-поршневой насос расположен непосредственно в гидробаке, насос приводился в движение от фланцевого электродвигателя, прикрепленного к стенке бака.

Стрела манипулятора двухсекционная, коробчатого сечения. Звенья раскладываются в вертикальной плоскости с помощью гидроцилиндров. Для плавной и безопасной работы звенья стрелы снабжены дросселями с обратными клапанами, препятствующими самопроизвольному опусканию секций стрелы при аварийных ситуациях.

Бетоновод, расположенный на стреле, выполнен в виде отдельных труб, соединенных быстроразъёмными муфтами с резиновыми манжетами для герметизации труб. На концевое звено надет гибкий шланг, позволяющий укладывать и распределять смесь по большой поверхности.

В последнее время разработано несколько конструкций автобетононасосов с манипуляторами, сочлененных с АБС, смонтированных на одном шасси автомобиля. Такая компоновка оборудования может весьма эффективно использоваться при производстве бетонных работ с малым объёмом и на объектах, расположенных на значительных расстояниях друг от друга и от бетонного завода, а также при бетонировании туннелей [9].

В настоящее время отечественной промышленностью освоен выпуск в основном двух марок АБН – СБ-126 и СБ-170 с модификациями [7].

§ 1.2. Применение автобетоносмесителей и автобетононасосов в составе агрегатов – технологических комплексов для приготовления и транспортирования бетонной смеси

Вопросы комплексной механизации приготовления и доставки бетонной смеси на строительные объекты в современных условиях могут быть решены только путем использования специализированных бетонотранспортных средств, пригодных для транспортирования бетонной смеси на любые расстояния с совмещением операций по приготовлению без дополнительно затраченного времени.

При укладке монолитного бетона подача бетонной смеси по трубам – один из перспективных способов ее транспортирования. В отличие от других способов, в том числе и подачи кранами в бадьях, при этом достигается полная механизация подачи и распределения бетонной смеси по фронту работ, высвобождается крановое оборудование, достигается возможность работы в стесненных условиях, сохраняется высокое качество смеси, потери ее сведены до минимума. Все эти достоинства в

полной мере относятся к АБС и АБН, что и предопределяет их широкое и повсеместное внедрение.

Однако потребность в АБС и АБН в настоящее время удовлетворяется не полностью. В связи с большой эффективностью укладки бетонной смеси с помощью АБН ведется разработка целого ряда надежно работающих бетононасосов с объемной подачей от 10 до 80 м³/ч. С учетом климатических условий нашей страны выпускаемые АБН должны быть рассчитаны на надежную и безотказную работу при отрицательной температуре окружающей среды. Это в равной степени относится и к АБС, которые, являясь комплектующим оборудованием одной с АБН технологической цепочки, создаются вместимостью от 3 до 12 м³. Наряду с этим при применении АБС и АБН необходимо соблюдать целый ряд требований не только к составам бетонной смеси, но и к уровню производства работ, что становится возможным только при детальном ознакомлении с особенностями технологии производства бетонных работ при участии АБС и АБН [10, 11].

§ 1.3. Процессы, происходящие при бетонировании монолитных конструкций с использованием автобетоносмесителей и автобетононасосов

Анализ существующих способов обработки бетонной смеси и ее компонентов [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20] позволил создать авторскую классификацию их с определением основных теплоносителей для применения в бетонных смесях (рис. 1.1). В этом ряду теплоносителем с максимальным тепловым эффектом является пар, причем коэффициент теплоотдачи пара значительно превосходит аналогичные параметры других теплоносителей

Так, величина коэффициента теплоотдачи газообразного теплоносителя колеблется в пределах от 1,2 до 58, воды – 230 – 11600, а пара – 4500 – 17500 Вт/(м² · °С) при пленочной его конденсации [21], т.е. при конденсации 1 кг пара в зависимости от давления, при котором происходит конденсация, выделяется 2048 – 2257 кДж (соответственно при давлении 0,8 – 0,1 МПа).

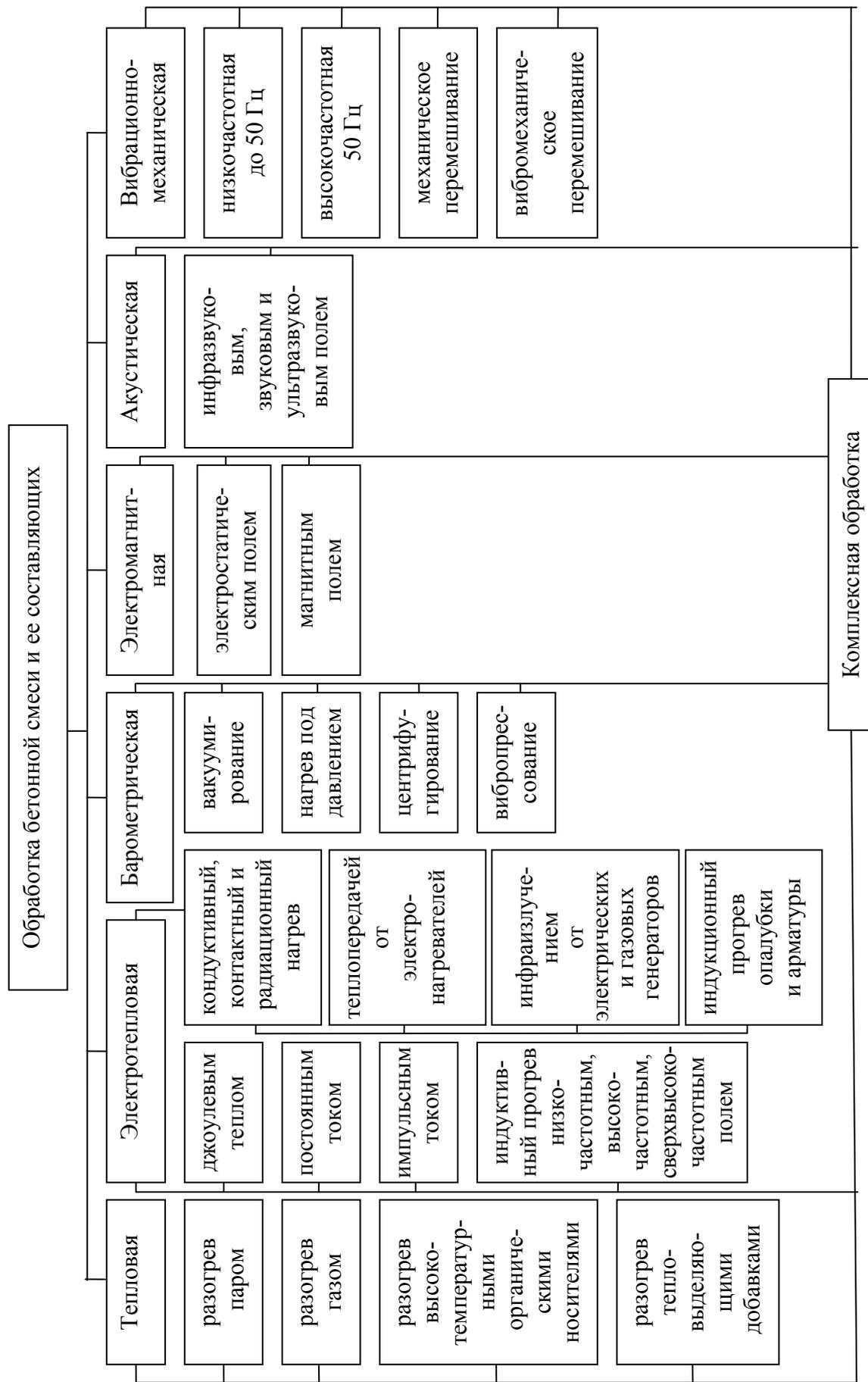


Рис. 1.1. Классификация способов обработки бетонной смеси и ее составляющих

Безусловно, этот факт не мог остаться незамеченным применительно к строительному производству и, в частности, к производству бетонных работ при отрицательной температуре наружного воздуха [22]. Еще в 1936 году И.Г. Совалов описывает нагревание паром «растворов и бетонов в барабане мешальных машин» [23].

Впоследствии использование пара для приготовления горячих бетонных смесей на строительной площадке упоминается в работе [1], описывается применение для монолитных бетонных работ в 1971 году фирмой «Эльба» (ФРГ) стационарных бетоносмесителей с принудительным перемешиванием.

В начале авторских исследований по применению пара для пароразогрева бетонной смеси в АБС [24] информация об использовании пара на строительной площадке в зимнее время ограничивалась рассмотрением подогрева заполнителей. В то же время известны многочисленные исследования по пароразогреву бетонной смеси при производстве сборного железобетона в заводских условиях.

Начало применению пара для пароразогрева бетонной смеси в стационарных бетоносмесителях положила датская фирма «Томас Шмидт» в 1965 году [25], впоследствии этот способ был применен в других зарубежных странах. Смесь разогревалась в специализированных бетоносмесителях влажным насыщенным паром со скоростью 0,8 – 1,5 °С за 1 с до 60 – 70 °С. Пар инъецировался в массу перемешиваемой смеси вместе с подогретой водой затворения.

В Советском Союзе и России первые исследования по пароразогреву бетонных смесей при производстве сборного железобетона были начаты в МИСИ им. В.В. Куйбышева и относятся к концу 1960-х годов [26, 27, 28]. Впоследствии пароразогретые бетонные смеси были предметом исследований ученых НИИЖБ, ВНИИжелезобетона, НИИСП Госстроя УССР, ЦНИИЭПжилища, ДИСИ, ЛИИЖТ, ЦНИИЭПсельстрой и др. [29, 30, 31].

Пароразогрев компонентов бетонной смеси происходит за счет тепла, выделяемого конденсирующимся паром на поверхности частиц смеси при ее смешивании. При этом смесь не только разогревается, но и увлажняется.

Пароразогрев компонентов бетонной смеси в утепленном смесительном барабане АБС целесообразно производить влажным насыщенным паром в связи с его низкой вязкостью и высокой проникающей способностью и теплоотдачей. Известно, что вязкость пара при температуре 100 – 120 °С

в 80 раз меньше вязкости воды при 20 °С. Указанные свойства пара характеризуют его как идеального влаго- и теплоносителя, использование которого улучшает гомогенизацию смеси. Высокая проникающая способность пара способствует также более быстрому, чем при других способах, нагреву компонентов бетонной смеси.

Пар, вступая в контакт с относительно холодными поверхностями компонентов бетонной смеси и внутренней поверхностью смесительного барабана, интенсивно конденсируется, высвобождая теплоту парообразования фазового перехода пара в воду, которая идет на увеличение влаго- и теплосодержания бетонной смеси, а также теплосодержания корпуса смесительного барабана АБС.

Происходящее в смесительном барабане АБС одновременное смешивание бетонной смеси и поступление пара с высокой скоростью значительно ускоряют процесс теплообмена. Взаимное трение частиц и кинетическая энергия потока пара уменьшают толщину пленки конденсата и изменяют ее течение, переводя его в состояние волнового и турбулентного, при котором коэффициент теплоотдачи возрастает.

Пониженная вязкость воды, вызванная повышением ее температуры, и повышенная проникаемость пара в сочетании с температурными перепадами, которым подвергаются компоненты бетонной смеси, приводят к постоянному разрушению вновь образующихся флоккул цементных частиц. При этом радиус этих частиц уменьшается с 55 мк (холодных) до 37 мк (пароразогретых) [32], т.е. при пароразогреве компонентов бетонной смеси происходит диспергация. Образующаяся конденсатная пленка также сдвигается попадающим в струю пара легкими частицами цемента и мелкого заполнителя. Условия теплообмена в этот период наиболее благоприятны, т.к. в начале процесса нагревания конденсатная пленка имеет относительно малую толщину.

На уменьшение толщины конденсатной пленки и начальный период положительное влияние оказывает и тот фактор, что, т. к. бетонная смесь еще достаточно суха, происходит упругое столкновение частиц. При последующем увлажнении смеси толщина конденсатной пленки увеличивается, а действие упругих сил уменьшается. По закону Я. Вант Гоффа, многократному увеличению скорости процесса диссоциации способствует максимальная проникающая способность теплоносителя, которая возможна при повышении его температуры до парообразования. Таким образом, максимально интенсифицируют реакции в бетонной смеси термохимические воз-

действия, осуществленные в период наибольшей концентрации реагирующих веществ.

Реализация определенных способов обработки бетонной смеси или их комбинации (комплексная обработка) зависят от особенностей применяемых механизмов и устройств. Чаще всего машины и средства механизации узкоспециализированы, например, устройства для нагрева заполнителей, дозаторы, смесители, транспортные средства. Вместе с тем создаются и используются устройства, которые могут совмещать и комбинировать воздействия на бетонную смесь.

Если рассматривать АБС не только как крупногабаритный транспорт для перевозки бетонной смеси, то можно увидеть его значительные и неиспользованные резервы. Прежде всего, необходимо исходить из концепции превращения его в технологически активный механизм, в котором возможно совмещение функций транспорта, смесителя, разогревателя, средства для приготовления высококачественной бетонной смеси, в том числе и с использованием химических добавок.

Получение бетона высокой прочности в монолитных конструкциях возможно лишь при условии следования основным законам природы.

С давних времен известно (триада Платона), для того чтобы увеличить прочность, необходимо предварительно максимально разъединить и в последующем организованно соединить компоненты в композит, т.е. чтобы вещество полностью усвоило энергию и упрочилось, необходимо сначала предельно разъединить его на частицы, молекулы, ионы, а после этого – соединять и упрочнять продукты реакции. При этом современной наукой доказано (синергетика И.Р. Пригожина), что этот процесс сопровождается появлением новых дополнительных эффектов.

Скорость химической реакции, согласно закону действующих масс К.М. Гульдберга и Г. Вааге (1864 – 1867), зависит от размера реагирующих веществ, температуры (правило Я.Х. Вант-Гоффа) и концентрации реагирующих веществ. При этом твердые вещества реагируют быстрее, если они тонко измельчены; при повышении температуры на каждые 10 градусов скорость химических реакций возрастает в два – четыре раза; скорость химической реакции при данной температуре прямо пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ в степенях с показателями, равными стехиометрическим коэффициентам в уравнении реакции. Для бетона, так же как и для синтеза различных материалов, наибольшее разъединение вяжущего возможно при внесении энергии. Это соответству-

ет принципу оптимальной дисперсности, выдвинутому П.А. Ребиндером [33, 34, 35].

Для увеличения движущей силы процесса физико-химического взаимодействия между гетерогенными фазами повышается поверхность их соприкосновения. Это достигается дополнительным совместным измельчением ингредиентов бетонной смеси (домолом).

М.И. Стрелков в 1953 году впервые применил мокрый домол цемента для разъединения смеси – так называемую глубокую гидратацию [36]. В это же время И.А. Хинт использовал дезинтеграторы для осуществления механических воздействий при раскалывании и обнажении поверхностей составляющих бетонной смеси [37]. Впоследствии В.И. Соломатов теоретически обосновал преимущества механического воздействия на ранней стадии приготовления бетонной смеси, создав интенсивную отдельную технологию бетонирования [38].

Таким образом, можно отметить, что дробление заполнителей, вызывая нарушение их структуры и появление в них микротрещин, приводит к снижению прочности, между тем как обнажение поверхностей составляющих компонентов бетонной смеси с удалением микрочастиц в раствор дает прирост прочности.

Смешивание – один из важнейших процессов в технологии производства бетона. Равномерность распределения исходных материалов между собой в бетоносмесителе во многом определяет физико-механические свойства затвердевшего бетона.

При приготовлении бетонной смеси необходимо равномерно распределить ее составляющие между собой, деаэрировать 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 плотности 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) [39, 40, 41].

Как малая, так и большая продолжительность смешивания не может обеспечить получения высокого качества смесей и бетона. В первом случае из-за недостаточного времени смешивания не достигнуто равномерное распределение составляющих, во втором - из-за измельчения заполнителей, вызывающего повышение водопотребности смеси, а также из-за возможного расслоения составляющих.

Одна из важнейших задач при приготовлении пароразогретой бетонной смеси – обеспечение в процессе смешивания равномерного распределения составляющих с целью достижения однородности смеси [42, 43]. Необходимо создать условия для максимального смачивания поверхности отдельных зерен цемента водой и обволакивания песчинок цементным тестом. При этом энергично развивается комплекс сложных физико-химических процессов [44, 45, 46].

Повышенная гидрофильность алюминатных минералов, склеивающих клинкерные составляющие цемента – двухкальциевый и трехкальциевый силикат, – обеспечивает энергичное проникновение воды в микрощели цементных зерен. Начинаясь гидратация вызывает химическое диспергирование полиминеральных цементных зерен. Этот процесс облегчается явлением адсорбционного понижения прочности цементных зерен в результате смачивания их поверхности. Смесь цемента с водой – цементное тесто – сразу после контакта этих материалов друг с другом начинает обогащаться частицами коллоидных размеров. Мельчайшие цементные зерна, находящиеся в воде, подчиняясь законам молекулярного притяжения, стремятся объединиться во флоккулы. Распределение воды внутри отдельных флоккул и между ними далеко не равномерно. Повышение равномерности распределения воды в цементе и разобшение слипшихся цементных зерен в процессе смешивания приводит к образованию более однородной коагуляционной структуры цементного теста, обеспечивающей лучшие технологические свойства бетонной смеси и более высокие качества затвердевшего бетона.

Одновременно с растворением клинкерных материалов происходят процессы выкристаллизовывания зародышей гидратов новообразований. Наиболее активной подложкой для роста кристаллов новообразований являются гидрофильные поверхности зерен кварцевого песка. Контакт поверхностей зерен песка с продуктами гидратации цемента во многом определяет прочность затвердевшего бетона. Зерна песка бывают покрыты тончайшими пленками пыли и глины, препятствующими образованию прочных контактных слоев. При смешивании бетонной смеси в результате многократных соударений частиц, трения их поверхностей друг о друга в присутствии воды, площадь пленок, препятствующих образованию контактов, уменьшается, обеспечивая улучшение физико-механических характеристик затвердевшего бетона.

Ввиду того, что все типы АБС представляют собой смонтированный на автомобильном шасси гравитационный реверсивный бетоносмеситель

[47], для получения высокой однородности бетонной смеси требуется определенное количество «перелопачиваний», что для гравитационных смесителей выражается суммарным числом оборотов смесительного барабана.

В своей работе Р. Лермит утверждает, что чем подвижнее смесь, тем короче время смешивания, и рекомендует для гравитационных смесителей с наклонной осью принимать наименьшее суммарное число оборотов барабана 40 – 120 [48]. Превышение указанных значений влечет за собой расслаивание смеси, увеличивающееся по мере уменьшения подвижности смеси и увеличения крупных фракций.

В составленном Американским институтом бетона Руководстве по контролю качества бетона [49] указано, что незначительное увеличение времени смешивания приводит к некоторому увеличению прочности и однородности прочности бетона.

При испытаниях гравитационных смесителей Валькер и Блюм установили, что увеличение продолжительности смешивания свыше 70 суммарных оборотов не улучшает однородности бетона, приготовленного из подвижных смесей; при приготовлении жестких смесей такое увеличение положительно сказывается на однородности затвердевшего бетона; изменение частоты вращения смесительного барабана с 3 до 12 об/мин весьма незначительно влияет на прочность получаемого бетона; суммарное число оборотов должно соответствовать регламентируемому для данного типа смесителей и состава смеси [50].

А. Жуазель [51] считает, что высококачественное смешивание в наклонном грушевидном барабане гравитационного бетоносмесителя достигается за 40 его суммарных оборотов.

Шведским стандартом [52] предусматривается различное оптимальное время смешивания для всех смесителей в зависимости от коэффициента вариации содержания цемента в пробе, который не должен превышать 6 – 8 %.

В работе [53] Р. Кирхем пишет, что продолжительность смешивания в гравитационном смесителе, необходимая для получения однородной смеси для данного типа смесителя, не зависит от состава смеси.

Согласно отечественному Руководству по производству бетонных работ в зимних условиях [54], с увеличением объема приготовляемой смеси продолжительность смешивания увеличивается и зависит от вида и состава смеси, а также от конструкции смесителя.

Процесс смешивания в АБС значительно отличается от процесса смешивания в стационарных гравитационных бетоносмесителях, поэтому для получения бетонной смеси требуемого качества руководствуются иными правилами [47].

Определяющие технологические параметры гравитационного бетоносмесителя – это емкость смесительного барабана, угловая скорость его и суммарное число оборотов, а также объемные соотношения емкости и готового замеса, емкости и объема загружаемых компонентов.

Один из важнейших параметров смесительного барабана – объемный коэффициент, 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 смешивание компонентов бетонной смеси при небольшой продолжительности – 1 – 2 мин.

У АБС объемный коэффициент составляет 0,5 – 0,6; это значит, что только 40 – 50 % пространства используется для создания потоков гравитационного смешивания компонентов бетонной смеси. Указанное свободное пространство относится к моменту окончания смешивания, а при загрузке до подачи воды в барабан свободного пространства будет еще меньше. Так, при коэффициенте выхода – отношении суммы объемов загруженных компонентов к объему замеса, – равному 0,65, свободного пространства в начале процесса будет всего 26 – 33 %, поэтому время на смешивание увеличивается до 15 – 20 мин.

Для процесса смешивания угловая скорость барабана принимается такой, чтобы компоненты бетона поднимались в верхнее пространство барабана и оттуда падали под действием силы тяжести. Для интенсификации процесса смешивания необходимо, чтобы высота падения была максимальной, что достигается увеличением угловой скорости, однако эта скорость не должна быть выше того значения, при котором возникают явления центрифугирования. Оптимальное смешивание в АБС достигается при вращении смесительного барабана с угловой скоростью в режиме «перемешивание» 6 – 12 об/мин.

Наряду со скоростью «перемешивания» регламентируется скорость вращения барабана в процессе «побуждения» смеси. Стандарт американского общества испытаний строительных материалов (ASTM) регламентирует для АБС скорость в режиме побуждения в диапазоне 2 – 6 об/мин.

Стандарты разных стран ограничивают минимальное общее число оборотов смесителя для получения однородной смеси и максимальное для предотвращения измельчения крупного заполнителя и избыточного разогрева смеси из-за перехода механической энергии в тепловую. ASTM предусматривает для АБС минимальное и максимальное число оборотов соответственно 70 и 100 при максимальной скорости вращения. ASTM ограничивает также общее число оборотов смесительного барабана АБС вне зависимости от скорости его вращения 300 оборотами. Отмечается, что соблюдение приведенных ограничений особенно важно при приготовлении составов на малопрочных известняковых заполнителях [55].

Аналогичные требования приняты и в отечественном СНиПе [56]. Он предписывает соблюдать при приготовлении бетонной смеси в АБС, загружаемых сухой смесью, условие, при котором число оборотов смесителя на замес должно быть не менее 70 и не более 300.

В работе [57] показано, что требования ASTM не являются достаточно обоснованными для ряда случаев. Так, максимально допустимое число оборотов барабана АБС, равное 100, не обеспечивает достаточной однородности смеси при распространенной схеме загрузки барабана последовательно в три этапа: I – песок, крупный заполнитель и 85 % воды, II – цемент, III – остальные 15 % воды. В этом случае удовлетворяющая однородность смеси достигается через 150 – 200 оборотов барабана.

Более эффективной оказалась пропорциональная загрузка барабана сразу всеми составляющими смеси при подаче сухих компонентов «слоевым пирогом» на ленте конвейера и одновременной заливке воды (15 % воды подавали в конце загрузки). При этой схеме загрузки продолжительность смешивания можно ограничить 30 оборотами барабана [1].

Кроме того, одно из важнейших свойств используемых при приготовлении бетонных смесей материалов – их влагоемкость. В зависимости от влажности составляющих компонентов АБС могут загружаться сухой смесью из предварительно высушенных заполнителей, увлажненной смесью из заполнителей естественной влажности, влажной смесью при повышенной влажности компонентов и смоченной смесью с количеством воды затворения до 70 %.

На практике наиболее часто при приготовлении в АБС применяют увлажненные смеси и смоченные. Первые позволяют обходиться без дополнительных операций на бетоносмесительном узле, вторые – наиболее эффективно использовать смесительный барабан АБС (коэффициент заполнения равен 0,7).

При этом крупный заполнитель (щебень, гравий) обладает хорошей сыпучестью при любой влажности. Осложнения возникают только в случае смерзания крупного заполнителя. Песок обладает превосходной сыпучестью при влажности менее 1 – 2 %, удовлетворительной при влажности 2 – 5 %. При большей влажности песок комкуется и образует своды, зависая и внезапно обрушиваясь большими порциями. Критическая влажность песка, при которой он теряет хорошую сыпучесть, сильно зависит от его гранулометрического состава, определяющего влагоемкость и водоудерживающую способность материала. Величина критической влажности обычно колеблется в пределах 5 – 10 %. Песок с влажностью, превышающей его водоудерживающую способность, становится текучим. Отрицательные температуры приводят к смерзанию влажного песка в крупные глыбы. Свойства цемента меняются в широких пределах. Проблема обеспечения сыпучести цемента возникает тогда, когда слежавшийся цемент образует своды и вертикальные стенки, склонные к внезапному обрушению. Высокая дисперсность и гигроскопичность цемента требует особо тщательной герметизации емкостей для предотвращения его гидратации и схватывания.

Процесс загрузки напрямую определяет процесс смешивания и зависит от ряда свойств применяемых материалов: дисперсности, гигроскопичности, формы частиц компонентов смеси, влажности, объемной массы, вязкости пастообразных и жидких состояний составов.

Двадцативосьмисуточная прочность бетона издавна и повсеместно используется для контроля качества материала и оценки его соответствия требованиям технических условий. Однако определение качества смешивания путем установления прочности и однородности затвердевшего бетона – интегральный параметр, на значение которого влияют многие не поддающиеся точному учету факторы: качество и условия хранения цемента и заполнителей, состав бетонной смеси и точность дозирования компонентов, условия изготовления, транспортирования, укладки и уплотнения смеси, условия твердения, отбора проб и испытание образцов, качества форм, состояние прессового хозяйства и целый ряд других факторов [58, 59, 60, 61].

Кроме того, длительное ожидание результатов испытаний серьезно ограничивает возможность текущего контроля производства бетона и эффективные корректирующие действия в случае несоответствия материала требуемому качеству.

Таким образом, представляется целесообразным использование методов анализа свежеприготовленной смеси, причем дополнительным условием является необходимость снятия «пассивной» характеристики, т.е. такой, при которой бетонная смесь могла бы быть возвращена в исследуемую массу без внесения с ней каких-либо изменений, могущих повлиять на процесс в целом.

Единственный метод, отвечающий требуемым условиям, – проверка однородности бетонной смеси по величине однородности ее объемной массы. Допустимым считается отклонение объемной массы в двух пробах из одного замеса не более 24 кг/м^3 [1].

Таким образом, несмотря на неоднократное рассмотрение вопроса смешивания при приготовлении бетонной смеси, до сих пор нет однозначного мнения о закономерностях происходящих процессов. Вышеприведенные данные доказывают, что пока нет единого мнения в вопросе обеспечения структурной однородности смеси в процессе смешивания ее в гравитационных бетоносмесителях. В то же время от структурной однородности зависит и ее температурная однородность.

Учитывая недостаточную изученность процесса пароразогрева бетонной смеси в АБС, представляется целесообразным провести исследование режимов смешивания во взаимосвязи с разогревом бетонной смеси паром в смесительном барабане АБС.

Между вяжущим и водой сразу вслед за смешиванием начинается процесс физико-химического взаимодействия, поэтому свойства бетонной смеси систематически изменяются. На интенсивность этого процесса оказывает влияние состав смеси, ее температуры и время, прошедшее с момента затворения. При этом бетонная смесь должна рассматриваться с двух точек зрения: как среда, свойства которой определяют характер взаимодействия элементарных частиц, и как смесь, обладающая пластично-жесткостными свойствами, однородность которой во время транспортирования и смешивания необходимо сохранять [62, 63, 64, 65, 66, 67].

В обычных условиях физико-химический процесс связан со смачиванием поверхности зерен цемента, с процессом гидролиза и гидратации, приводящим к увеличению дисперсности цемента [68, 69, 70, 71, 72]. Механическое смешивание и воздействие пара еще больше увеличивают дисперсность.

Опыты В.Н. Юнга и Ю.М. Бутта, С.В. Шестоперова [73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80] показали, что удлинение продолжительности смешивания

позволяет снизить пластическую прочность (рис. 1.2). Так, увеличение сроков смешивания с водой высокоалюминатного цемента, содержащего 14,1 % C_3A , с 1 до 15 мин продлевает время до начала схватывания с 2 до 38 мин, конец схватывания – с 3 до 90 мин (при этом необходимо увеличить в цементном тесте содержание воды с 29,5 до 42,5 %). Применяя вторичное смешивание в течение 5 мин (после перерыва вслед за первичным смешиванием за 5 мин), также увеличив количество воды до 36 %, можно увеличить время до начала схватывания с 2 до 90 мин, а конец – с 3 до 200 мин [80].

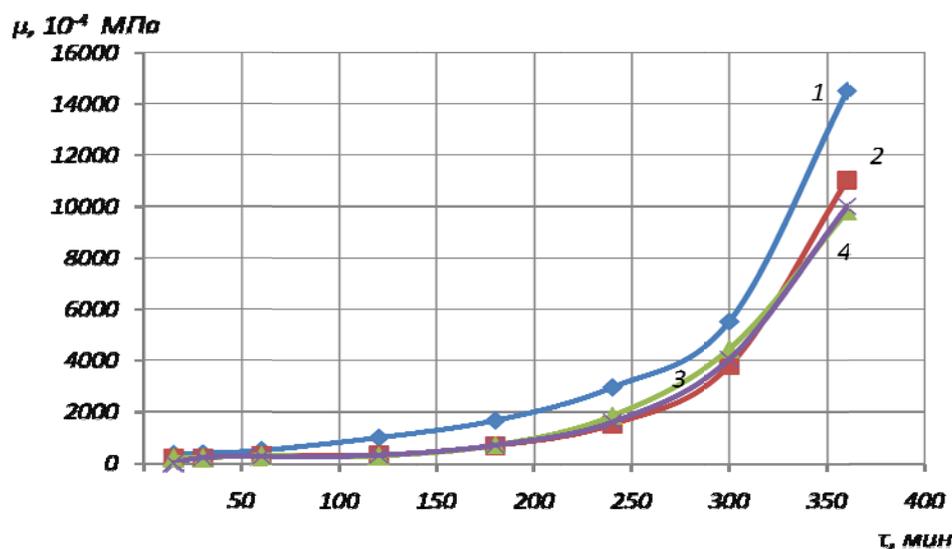


Рис. 1.2. Зависимость пластической прочности цементного теста от времени затворения при продолжительности смешивания:
1 – 5 мин; 2 – 10 мин; 3 – 15 мин; 4 – 20 мин

О своевременном внесении тепловой энергии в целях управляемого структурообразования неоднократно писал О.П. Мчедлов-Петросян [81, 82, 83, 84, 85]. Он открыл сингулярные точки внесения энергии и доказал, что тепло эффективно вносить в начале диффузионных процессов.

Учеными школы С.А. Миронова [36, 86, 87, 88] обнаружено, что неграмотное внесение тепла приводит к серьезным нарушениям структуры бетона: появлению температурных напряжений, капиллярной пористости, снижению прочности, ухудшению всех свойств.

Выбор требуемой температуры пароразогрева должен быть увязан с необходимыми пластично-жесткостными характеристиками смеси и с тепло-влажнотерями при транспортировании, разгрузке и подаче ее в бетонизируемую конструкцию [89, 90, 91].

Вязкость воды при повышении ее температуры уменьшается. Так, вода при температуре +80 °С обладает примерно 1/3 вязкости воды при +20 °С. Можно ожидать, что с уменьшением вязкости воды уменьшается жесткость бетонной смеси, однако опыты не подтверждают этого (рис. 1.3, 1.4) [89].

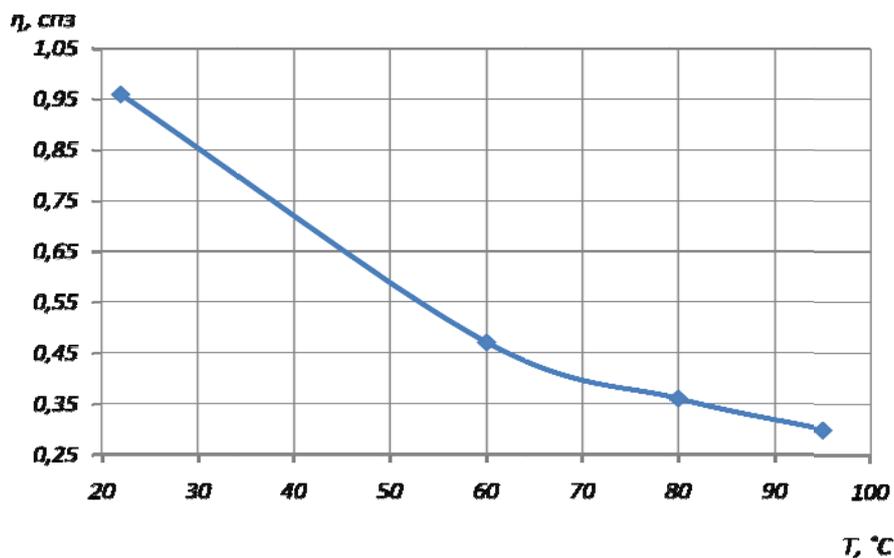


Рис. 1.3. Влияние температуры на вязкость воды

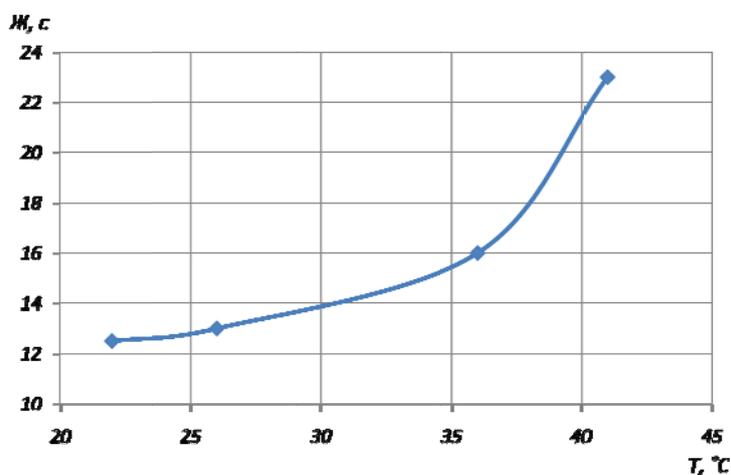


Рис. 1.4. Влияние температуры на жесткость бетонной смеси

Несмотря на понижение вязкости воды, жесткость смеси растет по мере повышения температуры бетонной смеси. Это можно объяснить увеличением водопотребности заполнителей и цемента, причем степень влияния будет зависеть от вида и крупности заполнителей и типа цемента.

Рассмотрим процесс взаимодействия зерен заполнителей с водой. По данным М.З. Симонова, при насыщении каменных пород водой при нормальном давлении в среднем только 60 % пор заполняются водой, при понижении давления (разрежение 500 – 600 мм рт. ст.) водопоглощение возрастает в среднем до 90 % [89].

Повышение температуры приводит к снижению парциального давления и водопоглощение возрастает.

Общее водонасыщение определяется количеством воды, заполняющей поры и адсорбирующейся на поверхности зерен. Очевидно, количество воды, поглощенной заполнителями за счет адсорбционной способности, будет зависеть от их удельной поверхности и толщины образующейся пленки.

По данным М.Г. Элбанидзе [89], толщина пленки при уменьшении среднего размера зерен кварцевого песка с 1,6 до 0,28 мм уменьшается с 4,1 до 3,9 мкм, удельная поверхность увеличивается с 18,5 до 129 см²/г, а водопоглощение изменяется с 0,00758 до 0,0504. На крупном заполнителе с зернами крупностью от 10 до 60 мм толщину пленочной воды можно принять в среднем 18 мкм [89].

Водопоглощение заполнителя зависит от вида и крупности (рис. 1.5, 1.6) [89].

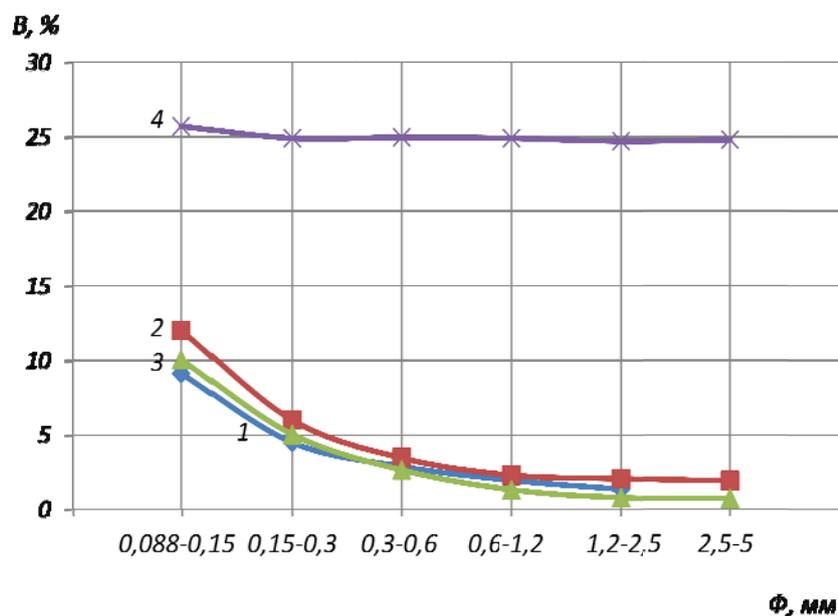


Рис. 1.5. Зависимость водопоглощения песков от размера фракций:
1 – морской; 2 – речной; 3 – кварцевый; 4 – пемзовый

Влияние повышения температуры на водопоглощение различных заполнителей количественно будет различно.

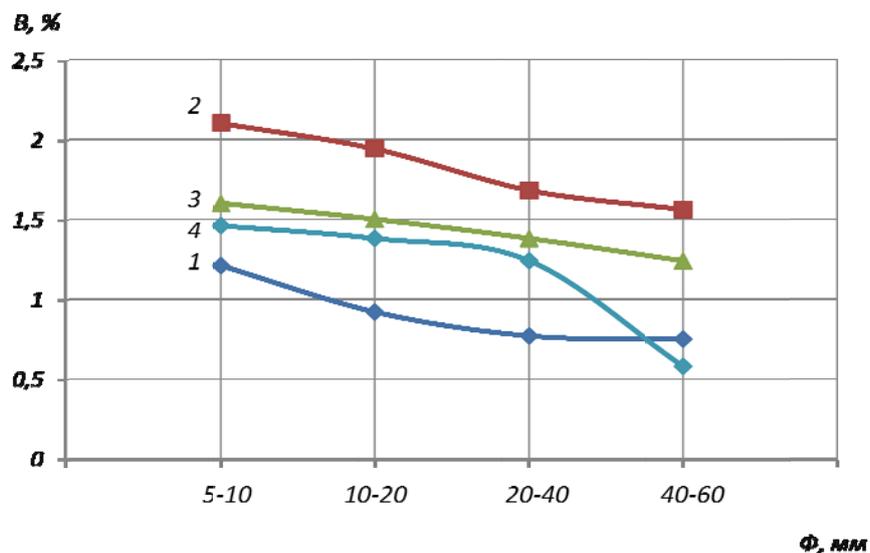


Рис.1.6. Зависимость водопоглощения щебня и гравия от размера фракций: 1 – гранитный щебень; 2 – базальтовый щебень; 3 – известняковый щебень; 4 – гравий речной

Рассмотрим процесс связывания воды цементом.

Формы связи воды классифицируют на химическую, физико-химическую и механическую. При взаимодействии с твердым телом структура и свойства воды претерпевают качественные изменения, которые тем значительней, чем тоньше пленка воды на поверхности или между поверхностями твердых тел.

В дисперсных и коллоидных системах, к которым относятся цементы [92, 93, 94, 95, 96, 97], удельная поверхность очень велика. При взаимодействии молекул воды с частицами цемента их поверхность покрывается тонким слоем воды, которая удерживается адсорбционными силами.

Источник этих сил – некомпенсированность ионных или молекулярных сил на поверхности раздела двух фаз в межфазовом поверхностном слое.

Основа адсорбционных процессов – господствующий во всех явлениях природы закон, выражающийся в тенденции систем самопроизвольно уменьшать запас свободной энергии. Стремясь снизить свою поверхностную энергию и нейтрализовать электрический заряд, дисперсная частица притягивает к себе молекулы воды, имеющие дипольную структуру.

На поверхности частиц цемента адсорбируются не только молекулы воды. Большинство частиц, состоящих из ионных кристаллов, имеют от-

рицательный заряд и поэтому около их поверхности скапливаются катионы, находящиеся в воде. Они образуют вокруг частиц два слоя: адсорбционный и диффузионный. Адсорбционный слой располагается около поверхности частиц, а за ним следует диффузионный слой.

Связывание воды рассматривается как разновидность явлений гидратации, протекающей в две стадии [89]. Сначала под влиянием поверхностных сил разрываются первичные водородные связи между молекулами воды, а затем они вступают в водородную связь с кислородными и гидроксильными группами на поверхности частиц. Гидратация, создаваемая ионизированными группами (ионная гидратация), протекает полнее, и молекулы воды тем прочнее удерживаются на поверхности минеральных частиц, чем больше соответствие кислородных и гидроксильных групп в упорядоченной структуре молекул воды, ориентированных в электрическом поле.

Под влиянием силового поля на поверхности частиц, к которым притягиваются диполи воды, снижается кинематическая энергия ее молекул, что затрудняет их отрыв от минеральных частиц. Поскольку активные центры отделены друг от друга энергетическими барьерами, то для перемещения молекул воды в силовом поле поверхности частиц необходимо внешнее тепловое и механическое воздействие.

Именно поэтому подача пара в сухую или малоувлажненную смесь интенсифицирует, по сравнению с затворенной смесью, этот этап гидратации. Это нашло косвенное подтверждение в работах В.Ф. Афанасьевой [98]. Она изучила влияние способа ввода пара на степень гидратации и прочность горячих бетонных смесей.

Было установлено, что наибольшая прочность достигается, если сначала довести сухую бетонную смесь до температуры разогрева, а потом добавить остальное количество воды. При такой последовательности конечная прочность увеличивается на 10 – 15 % по сравнению со способом, при котором ввод пара осуществляется после введения воды затворения. Можно также предположить, что аналогичен по последующему результату и мокрый домол частично затворенной смеси.

Толщина пленки воды, состоящей из адсорбционного и диффузного слоев (сольватная оболочка), зависит от минералогического состава (химического потенциала), размера и формы частиц, химического состава адсорбционных ионов и от внешних условий (атмосферного давления и температуры) [89, 99].

Специфические свойства адсорбированной воды с различной молекулярной структурой существенно влияют на процессы формирования физико-химических свойств цементного теста, а следовательно, бетонной смеси и прочности бетона.

Максимальной гигроскопичности цемента соответствует наибольшее количество гигроскопической влаги, адсорбированной из окружающей среды на поверхности цементных частиц, поглощенное из воздуха при относительной влажности его, близкой к 0,94.

Наиболее обоснованной теорией адсорбции паров влаги является теория Лангмюра, согласно которой молекулы воды, ударяющиеся о поверхность твердого тела, удерживаются на ней под влиянием сил адсорбции.

Тенденция паров сгущаться на поверхности твердого тела связана с дипольным строением молекул воды. Удержанные поверхностью частиц цемента молекулы воды могут снова испариться, причем скорость их испарения будет зависеть от поверхностных сил и, если они достаточны, то покрытие цементных частиц адсорбированными молекулами опережает испарение. При влажности, соответствующей максимальной гигроскопичности цемента, на поверхности его частиц образуется мономолекулярный слой адсорбированной влаги, который с увеличением относительной влажности воздуха превращается в полимолекулярную водную оболочку.

Цемент, содержащий гигроскопическую влагу, при дальнейшем увлажнении способен связать на своей поверхности еще некоторое количество воды. Эта «рыхлосвязанная» вода образуется уже при адсорбции на частицах цемента влаги при конденсации пара. По своим параметрам «рыхлосвязанная» вода диффузного слоя значительно меньше отличается от обычной воды, чем прочносвязанная (адсорбционная), и тем не менее она существенно влияет на свойства системы «цемент + вода» [89].

Портландцементы, влажность которых не превышает величину максимальной гигроскопичности (2,5 – 5 % массы цемента), относят к коллоидгидратам. Диполи гигроскопической влаги ориентированы в поверхностном слое кристаллической решетки цементных минералов и не изменяют расстояние между частицами цемента.

При смешивании влажного заполнителя с цементом, последний приобретает недостающую гигроскопическую влагу, но на процессы структурообразования эта влага заметного влияния не оказывает [89].

При смешивании сухого цемента с водой происходит связывание воды. Ее внутренние слои удерживаются поверхностью частиц с большей силой, чем внешние. Прочность связи отдельных слоев цемента с минералами различна, и слои жидкой фазы, находящиеся на различном расстоянии от поверхности, неоднородны по химическому составу и неравноценны по физическим свойствам.

Главные из сил, определяющие энергию адсорбции цемента, – электростатические силы взаимодействия между ионами поверхности частиц и диполями воды. Эти силы имеют незначительный радиус действия, не превышающий несколько ангстремов [89]. На расстояниях от поверхности частиц более диаметра молекул воды силы взаимодействия дополняются поляризационными или дисперсными Ван-дер-ваальсовыми силами, обусловленными «мгновенными диполями», возникающими благодаря движению электронов в молекуле. Эти силы имеют радиус действия, достигающий нескольких молекулярных диаметров. При адсорбции воды минеральными частицами адсорбированная молекула принимает ориентированное положение, притягиваясь своим положительным или отрицательным концом: поверхность первого слоя дипольных молекул притягивает второй, второй – третий и т.д. Очевидно, что с удалением от поверхности частиц прочность связи уменьшается. Количество воды, удерживаемой поверхностными силами цементных частиц, характеризует предельную водоудерживающую способность цемента.

Как показал И.Н. Ахвердов [89], предельная водоудерживающая способность цементного геля связана корреляционно с рядом физических и физико-химических свойств цемента: она может изменяться в широких пределах в зависимости от минералогического состава и дисперсности цемента, количества и вида введенных добавок, а также способа и интенсивности механического воздействия на цементный гель.

Согласно исследованиям И.Н. Ахвердова [89], предельная водоудерживающая способность или влагоемкость цемента

$$k_{np} = 1,65k_{н.г} = 1,87k_{он}, \quad (1.1)$$

где $k_{н.г}$ – В/Ц цементного теста нормальной густоты; $k_{он}$ – В/Ц, определяемое количеством адсорбционно связанной воды, при котором достигается полное обводнение частиц цемента в процессе вытеснения молекул газов с их поверхности.

Водоудерживающая способность цемента $k_{np} = 1,65_{н.г}$ не является физической константой, т. к. в зависимости от характера механического воздействия на цементное тесто количество воды, удерживаемое им, может возрасти или уменьшиться.

При затворении цемента водой в процессе смешивания мелкие флоккулы не дезагрегируются, а более крупные распадаются на отдельные микрообъемы, поэтому независимо от концентрации твердой фазы цементный гель представляет собой дисперсную систему, состоящую из микроагрегатов и отдельных частиц, связанных силами Ван-дер-Ваальса. Различные по крупности микроагрегаты, разделенные тонкими прослойками дисперсной среды, образуют коагуляционную структуру.

На рис. 1.7 приведено влияние дисперсности портландцемента минералогического состава $C_3A - 5,8 \%$, $C_4AF - 9,2 \%$, $C_3S - 62 \%$, $C_2S - 21,5 \%$, прочие – $1,8 \%$ на $k_{н.г}$ и $k_{оп}$.

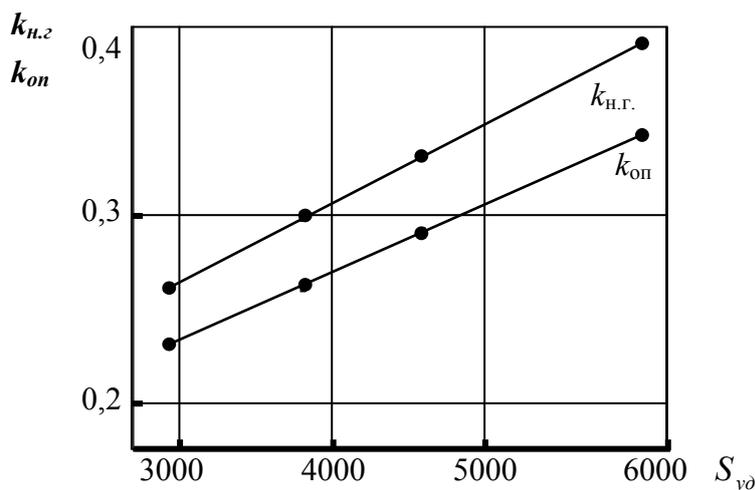


Рис. 1.7. Влияние дисперсности цемента на $k_{н.г}$ и $k_{оп}$

Сухой и мокрый домол могут привести к увеличению водопотребности цемента, кроме того, смешивание сопровождается нарушением сплошности диффузных слоев дисперсной среды цементного геля. Будет происходить дефлоктация (пептизация) во всем объеме цементного геля, что должно повысить водоудерживающую способность и гомогенизацию смеси, т.к. возникают непосредственные контакты между дезагрегированными цементными частицами.

Домол в сухом и мокром состоянии – прием активации цемента, заключающийся в дополнительном измельчении цементных зерен и повышении удельной поверхности и улучшении взаимодействия с водой.

Эффект мокрого помола был открыт П.А. Ребиндером [100]. Эффективность мокрого помола клинкера основана на понижении прочности материала в водной среде вследствие расклинивающего действия пленок воды при всестороннем обжатию в дефектах клинкерных частиц.

При загрузке в АБС отдозированной сухой смеси или естественной влажности смесь может быть приготовлена и разогрета сразу и затем транспортироваться в готовом состоянии или приготавливаться и разогреваться после транспортирования. Во втором случае при транспортировании в режиме побуждения цемент будет подвергаться домолу в сухом состоянии.

При загрузке в АБС отдозированной влажной или частично затворенной смеси она может быть также приготовлена и разогрета сразу или после транспортирования. Отличие будет состоять в разном периоде гидратации до разогрева, а также в домоле во влажном состоянии при разогреве после транспортирования.

Домол при транспортировании бетонной смеси в АБС позволяет:

а) устранить снижение активности цемента от лежания, которая происходит вследствие адсорбции влаги и CO_2 из воздуха на поверхность его зерен, в том числе, когда цемент горячий;

б) уменьшить перерасход цемента из-за необходимости хранения на строительной площадке цемента разнообразных видов и марок в одной емкости;

в) значительно выравнивать минералогический состав цемента.

Для расчета температуры бетонной смеси после ее транспортирования в автосамосвалах общего назначения нормативной литературой [54, 101, 102] рекомендуется следующая расчетная формула:

$$\Delta t_{mp} = \Delta t'_{mp} \Delta T \tau, \quad (1.2)$$

где $\Delta t'_{mp}$ – изменение температуры бетонной смеси ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}$) при транспортировании в течение одной минуты в условиях перепада температур бетонной смеси и окружающего воздуха в 1°C ; ΔT – перепад температур наружного воздуха и перевозимой бетонной смеси, $^{\circ}\text{C}$; τ – продолжительность транспортирования бетонной смеси, мин.

Значения $\Delta t'_{mp}$, рекомендуемые [54, 101, 102], не учитывают условия теплообмена поверхности бетонной смеси с окружающей средой, зависящие от скорости перемещения транспортного средства и направления и скорости ветра.

Изменение скорости обветривания – суммы собственной скорости транспортного средства и скорости встречного ветра – с 5 м/с (при скорости автомобиля 18 км/ч в безветренную погоду) до 25 м/с (при скорости автомобиля 50 км/ч и скорости встречного ветра 10 м/с) ведет к изменению коэффициента теплообмена α при использовании зависимости [103]:

$$\alpha = 3,48 + 11,6\sqrt{V_b}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C} \quad (1.3)$$

от $\alpha = 30 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ в первом случае, $\alpha = 60 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ – во втором.

В Руководстве по производству бетонных работ в зимних условиях [54] указано, что значения $\Delta t'_{tr}$ приняты для $\alpha = 14 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$, т.е. для скорости обветривания $V_b = 0,95 \text{ м/с}$, что соответствует движению транспортного средства со скоростью около 3 км/ч в безветренную погоду. Естественно, что при транспортировании бетонной смеси в реальных условиях теплотери бетонной смеси должны оказаться более значительными.

Зависимости, определяющие снижение температуры бетонной смеси при транспортировке в самосвалах, рекомендуемые Американским научно-исследовательским институтом цемента и бетонов [104], также не связывают теплотери с условиями теплообмена.

Закономерности испарения влаги из бетонной смеси и бетона изучали Г.А. Бужевич, И.Б. Заседателев, В.Г. Петров-Денисов, Е.И. Богачев, А.Д. Дмитриевич, Н.Б. Марьямов, С.А. Миронов, Е.Н. Малинский, Т.М. Штоль и Г.И. Евстратов, В.Н. Андрющенков, А.И. Гныря [105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112].

В работах [105, 109] установлено, что в первый период, так называемый период постоянной скорости сушки, испарение влаги из бетона при его тепловой обработке происходит так же, как испарение воды со свободной поверхности.

В зависимости от условий массообмена влагопотери могут достигать значительных величин. Согласно В.Н. Андрющенкову [113], при транспортировании открытой бетонной смеси на транспортной ленте величина испарения может колебаться в пределах 20 - 40 л/м³ бетона.

Несмотря на столь значительные величины возможных влагопотерь, уровень их допустимости, по крайней мере, для транспорта товарных бе-

тонных смесей, действующей нормативной литературой не предусматривается и не регламентируется.

Исследования влагопотерь бетонных смесей, проведенные Бюро мелиорации США [114], определили следующие размеры потерь воды на испарение при перевозке смеси в АБС за 2 ч транспортирования: при закрытой горловине смесителя – 0,5 %, при открытой горловине – 3,0 %.

§ 1.4. Организация производства с использованием технологических комплексов автобетоносмеситель – автобетононасос

Сравнительный анализ опыта эксплуатации бетононасосов и кранов при укладке бетонной смеси показал, что краны эффективнее использовать на монтажных работах (перемещение опалубки, арматуры и др.), а бетононасосы – при укладке бетонной смеси, освобождая при этом крановое оборудование. Специализированное и совмещенное использование того или другого оборудования сокращает затраты и повышает производительность труда.

Отличительная особенность бетононасосов – их высокая мобильность, что в современных условиях в ряде случаев является решающим фактором.

Был проведен сравнительный технико-экономический анализ различных способов укладки бетонной смеси с помощью бетононасосов, башенных кранов, строительных подъёмников и ленточных конвейеров.

При сравнении сменной производительности при укладке бетонной смеси бетононасосом, башенным краном и ленточным конвейером выявлено, что производительность бетононасоса в 3,3 раза выше башенного крана, в 2,7 раза выше ленточного конвейера и в 3 раза выше строительного подъёмника.

Анализируя зависимость стоимости укладки 1 м^3 бетонной смеси бетононасосом, башенным краном и ленточным конвейером, можно сделать следующий вывод: несмотря на то что стоимость укладки бетононасосом несколько выше, чем укладки другим оборудованием, последнее имеет примерно в два раза меньшую сменную производительность.

Расчеты показывают, что бетононасос целесообразно применять при больших объёмах бетонных работ. При этом отмечается, что при укладке бетонной смеси бетононасосами рабочих занято в 3,7 раза меньше, чем при

укладке ленточным конвейером, и в 2,1 раза меньше, чем при укладке с помощью башенного крана, а производительность одного рабочего при работе бетононасосом составляет 58,6, конвейера - 5,8, а башенного крана - 7,5 м³/смену.

Анализ производительности по укладке бетонной смеси на различную высоту при различных коэффициентах использования (для бетононасоса коэффициент использования равен 1) показывает явное преимущество бетононасоса [10].

§ 1.5. Расширение технологических возможностей применения автобетоносмесителей

Применяемые в строительстве машины и средства механизации, как правило, узкоспециализированны. В производстве бетонных работ к ним можно отнести: устройства для нагрева заполнителей, дозаторы, смесители, транспортные средства. Однако создаются и используются такие устройства, которые могут совмещать и комбинировать воздействия на бетонную смесь. Если проанализировать авторскую классификацию способов обработки бетонной смеси и ее составляющих, представленную в § 1.3, то можно увидеть, что реализация определенных способов обработки бетонной смеси или их комбинации (комплексная обработка) зависят от особенностей применяемых механизмов и устройств.

И в этой связи значительные и неиспользованные резервы можно увидеть, если рассматривать АБС не только как крупногабаритный транспорт для перевозки готовой бетонной смеси. В АБС возможно совмещение функций транспорта, смесителя, разогревателя, средства для приготовления высококачественной бетонной смеси, в том числе и с использованием химических добавок. Таким образом, возможна реализация концепции превращения АБС в технологически активный механизм для комплексной обработки бетонной смеси.

Использование пара для разогрева бетонной смеси в смесительном барабане АБС позволяет значительно расширить его технологические возможности [115, 116, 117]. При выборе технологии бетонирования монолитных конструкций пароразогретыми в АБС смесями необходимо исходить из возможности приготовления горячих смесей:

- при строительстве объектов, время доставки бетонной смеси к которым не превышает технологически допустимого для данного вида смеси, - на бетонном узле;

- при строительстве объектов второй и последующих очередей, а так же на реконструируемых предприятиях, - с получением пара от существующих стационарной котельной или паропровода;

- при строительстве отдельно расположенных объектов, в том числе удаленных на значительное расстояние, - с применением передвижных парогенераторов;

- двухстадийно, - с пароразогревом компонентов бетонной смеси на бетонном узле и последующим пароразогревом на строительном объекте.

При этом АБС могут загружаться смесью:

- из предварительно высушенных заполнителей (сухой);
- из заполнителей естественной влажности (увлажненной);
- при повышенной влажности компонентов (влажной);
- с количеством воды затворения до 70 % (смоченной).

В зависимости от принятой схемы загрузка может осуществляться как послойно – при загрузке через люк на боковой стенке смесительного барабана, так и с предварительным смешиванием компонентов смеси – при загрузке через заднее торцовое отверстие. При послойной загрузке компонентов бетонной смеси, в том числе заполнителей естественной влажности, составляющие бетонной смеси не подвергаются особым изменениям, так как цемент укладывается последним. Загрузка с предварительным смешиванием компонентов смеси может быть как последовательной, так и пропорциональной. При последовательной загрузке материалы подаются в следующем порядке: песок, крупный заполнитель, цемент, вода. Пропорционально загружают сразу все составляющие смеси при подаче сухих компонентов «слоеным пирогом» на ленте конвейера. Послойная загрузка через люк в боковой стенке смесительного барабана применяется крайне редко и поэтому в работе не рассматривается.

Смешивание бетонной смеси может происходить:

- при загрузке (скорость вращения барабана от 9 до 12 об/мин);
- побуждении (2 – 6 об/мин);
- перемешивании (6 – 12 об/мин);
- периодическом побуждении и перемешивании;
- разгрузке (9 – 12 об/мин).

Кроме того, бетонная смесь может выдерживаться в смесительном барабане без его вращения.

Пароразогрев бетонной смеси в смесительном барабане АБС возможен путем введения поочередно или одновременно пара и воды в сухую, увлажненную или влажную смесь и пара в смоченную смесь. При этом во-

ду целесообразно вводить с температурой, равной или выше температуры приготавливаемой бетонной смеси.

При этом пар можно вводить двумя путями:

- на смесь (ввод пара в свободное пространство смесительного барабана);

- в смесь.

Пароразогрев бетонной смеси может происходить на стоянке АБС при вращении барабана, скорость его может быть любой – от 2 до 12 об/мин. Бетонную смесь транспортируют в режиме побуждения или без вращения барабана, так как возникающие при вращении барабана с большей скоростью центробежные усилия могут привести к опрокидыванию АБС, особенно на поворотах.

Пароразогрев бетонной смеси в процессе транспортирования в настоящее время невозможен из-за отсутствия выпускаемого промышленностью малогабаритного парогенератора.

Таким образом, транспортирование в АБС может осуществляться холодных компонентов бетонной смеси, холодной, подогретой или горячей бетонной смеси.

Добавки в бетонную смесь можно вводить на любом этапе приготовления и транспортирования смеси.

Единственное существенное требование при разгрузке бетонной смеси – выбор такой скорости разгрузки, которая позволяет избежать расслаивания смеси.

Бетонную смесь можно подавать непосредственно в конструкцию по лотку (желобу) или по бетоноводу автобетононасоса, а также краном с перегрузкой в бункера.

Пароразогретую бетонную смесь целесообразно укладывать в кратчайшие сроки во избежание потери подвижности и тепла. Увеличить подвижность пароразогретой смеси можно, применив пластифицирующие добавки, например С-3 [118]. Уплотнение ее в конструкциях нецелесообразно ввиду нарушения структуры новообразований горячей смеси.

Выдерживать бетон из пароразогретой смеси в конструкциях можно только способом термоса или комбинацией его с другими способами и с утеплением.

Возможные технологические варианты бетонирования монолитных конструкций при отрицательной температуре наружного воздуха пароразогретыми в АБС смесями представлены на авторской технологической блок-схеме (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Технологическая блок-схема бетонирования монолитных конструкций в зимнее время пароразогретыми в автобетоносмесителях смесями

Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИГОТОВЛЕНИЯ, ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ, ПОДАЧИ И УКЛАДКИ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЬ – АВТОБЕТОНОНАСОС

§ 2.1. Приготовление и транспортирование бетонных смесей в автобетоносмесителе

Исходные материалы, загружаемые в АБС, могут представлять собой сухую смесь, частично затворенную (смоченную) или готовую бетонную смесь. В зависимости от вида загружаемой смеси возможна работа АБС в трех режимах: включение смесительного барабана в пути следования или на строительной площадке за 10 – 20 мин до разгрузки, включение смесительного барабана непосредственно после его загрузки, периодическое включение и выключение барабана в процессе транспортирования бетонной смеси на строительную площадку.

Первый режим применяют при загрузке сухой или частично затворенной смеси и последующем приготовлении готовой бетонной смеси с заданной подвижностью при больших расстояниях перевозок (время в пути более 1 ч). Второй режим применяют для приготовления бетонной смеси во время пути следования (продолжительность перевозки до 1 ч) сразу же после загрузки АБС сухой или частично затворенной смесью, а также при доставке готовых смесей на небольшие расстояния (время в пути не более 30 – 40 мин) с целью их постоянного побуждения. Третий режим используют при продолжительности доставки готовых бетонных смесей 1,5 – 2 ч за счет восстановления их подвижности путем периодического побуждения.

Требуемая компактность машины не позволяет увеличивать диаметр смесительного барабана с тем, чтобы приблизиться по параметрам к стационарным гравитационным бетоносмесителям.

Время на перемешивание для АБС не ограничивается, его можно совмещать со временем нахождения в пути. Однако в этом случае не рекомендуется двигаться с большой скоростью, чтобы смещение груза на одну сторону смесительного барабана не нарушило устойчивости машины.

Получение готовой бетонной смеси нужного состава в большой степени зависит от дозирочного оборудования, конструкция же смесителя

должна обеспечить распределение компонентов с максимально возможной однородностью. Для получения хорошей однородности бетонной смеси требуется определенное количество "перелопачиваний", что для гравитационных смесителей выражается суммарным числом оборотов смесительного барабана.

Длительной практикой применения АБС установлено оптимальное число оборотов смесительного барабана с момента подачи воды; в зависимости от нужной подвижности смеси суммарное число оборотов составляет 60 – 100 (верхний предел относится к малоподвижной смеси).

Частота вращения смесительного барабана при различных операциях принимается различной. Средние значения частоты вращения, приведенные в технической характеристике машины, относятся к операции перемешивания, минимальные – к побуждению в пути или на стоянке. Максимальные значения частоты вращения относятся к загрузке смесительного барабана; это необходимо для быстрого принятия компонентов из воронки и направления их внутрь барабана с тем, чтобы предотвратить переполнение загрузочной воронки и образование заторов в горловине барабана.

Для процесса перемешивания частота вращения барабана принимается такой, чтобы компоненты бетона поднимались в верхнее пространство барабана и падали под действием силы тяжести. Для интенсификации процесса перемешивания желательно, чтобы высота падения была максимальной, что достигается увеличением частоты вращения, однако не должна быть выше того значения, при котором начинаются явления центрифугирования. Обычно частота вращения при перемешивании составляет 6 – 12 об/мин.

Разгрузка АБС ведется при обратном вращении барабана, частота вращения его (устанавливается оператором) составляет 5 – 10 об/мин. Большое значение имеет окончание разгрузки. Пульт управления смесительным барабаном расположен близко к загрузочно-разгрузочному устройству, что позволяет оператору визуально наблюдать за процессами загрузки и разгрузки и корректировать частоту вращения смесительного барабана. Не рекомендуется превышать установленный объем готового замеса, так как из-за отсутствия свободного пространства для гравитационного перемешивания в переполненном барабане не могут образоваться интенсивные потоки. Оптимальным можно считать соотношение объемов готового замеса к геометрическому в пределах 0,52 – 0,58 (объемный коэффициент 0,5 – 0,6).

Технологическая вода затворения подается в смесительный барабан непосредственно перед приготовлением смеси. При этом важно соблюдение точности ее дозирования счетчиком-водомером, дублируемой визуально по водомерному стеклу, установленному на водяном баке. Струя воды, выходящая из насадки, должна орошать по возможности большую поверхность материалов, находящихся в барабане, на всю его глубину, с одновременным смачиванием горловины. По смоченной поверхности горловины лучше скользит готовая смесь при разгрузке [1].

Доставку бетонной смеси на плотных заполнителях с завода товарного бетона на строительную площадку организуют так, чтобы на месте укладки она имела заданную подвижность и однородность, а изготовленный из нее бетон имел проектную марку по прочности, морозостойкости, водонепроницаемости, истираемости и другим требуемым характеристикам. Выбор средств и режимов транспортирования бетонных смесей, а также допустимые продолжительность и дальность перевозок устанавливаются с учетом свойств применяемых материалов, природно-климатических условий строительства и состояния дорог (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Предельные расстояния транспортирования бетонной смеси АБС при температуре окружающего воздуха до 25 °С, км

| Подвижность бетонной смеси, см | Вид дорожного покрытия | Скорость транспортирования, км/ч | Время транспортируемой смеси, мин | | |
|--------------------------------|------------------------|----------------------------------|---|----------------------------------|-------------------------|
| | | | сухой | частично затворенной (смоченной) | готовой (с побуждением) |
| 1 – 3 | Жесткое | 30 | не ограничено | до 120 | до 100 |
| 4 – 6 | Асфальт | 30 | | 100 | 80 |
| 7 – 9 | Асфальто-бетон и т.п. | 30 | | 80 | 60 |
| 10 – 14 | | 30 | | 60 | 45 |
| 1 – 3 | Мягкое | 15 | Не рекомендуется ввиду быстрого выхода из строя технологического оборудования | | |
| 4 – 6 | Грунтовое | 15 | | | |
| 7 – 9 | Улучшенное | 15 | | | |
| 10 – 14 | | 15 | | | |

При доставке сухих бетонных смесей в автобетоносмесителях влажность всех загружаемых компонентов не должна превышать 3 – 4 % во избежание образования в барабане комьев из слипшегося с заполнителями цемента, что ухудшает качество бетонной смеси и препятствует нормаль-

ной ее выгрузке из смесительного барабана. В связи с этим заполнители, имеющие влажность 5 – 10%, предварительно обрабатывают раствором комплексной добавки, содержащей ГКЖ-94 – 0,01 % по массе цемента, СДБ – 0,2 % и CaCl_2 – 0,5 %. Бетонную смесь готовят путем затворения сухой смеси и перемешивания компонентов в течение 20 – 25 мин при частоте вращения смесительного барабана 6 – 12 об/мин. В случае загрузки в АБС частично затворенной смеси на заводе товарного бетона вводят не более 2/3 воды затворения, а оставшуюся часть – в пути следования или непосредственно на строительной площадке. Бетонную смесь перемешивают в течение 10 – 15 мин при частоте вращения смесительного барабана 4 – 10 об/мин.

Побуждение готовой бетонной смеси в процессе ее доставки производят путем периодического (через каждые 30 – 40 мин) интенсивного перемешивания в течение 5 – 7 мин при частоте вращения смесительного барабана 14 – 20 об/мин. Такой режим побуждения позволяет достичь максимального пластифицирующего эффекта при транспортировании готовых бетонных смесей, что увеличивает в 1,5 – 2 раза допустимую продолжительность их доставки в АБС.

АБС позволяет уменьшить потерю подвижности легкобетонных смесей при транспортировании, исключить влияние погодных факторов на качество доставляемой смеси. Предпочтительнее использовать АБС, в которых можно осуществлять доставку не только готовых, но частично приготовленных и сухих легкобетонных смесей, а также дополнительно перемешивать смесь перед выгрузкой с целью повышения ее однородности.

Продолжительность транспортирования готовой легкобетонной смеси в АБС в зависимости от начальной подвижности смеси и температуры окружающего воздуха составляет не более 45 – 60 мин при использовании водонасыщенных заполнителей и 30 – 40 мин - сухих. При большей продолжительности транспортирования требуется увеличить начальную подвижность приготовляемой на заводе бетонной смеси, что ведет к перерасходу цемента и повышению себестоимости бетона. Целесообразнее доставлять сухую или частично приготовленную легкобетонную смесь. При загрузке в АБС частично приготовленной бетонной смеси на заводе товарного бетона вводится 65 – 75 % воды затворения, а оставшееся количество воды вводится в барабан АБС на строительной площадке или в пути следования за 15 – 20 мин до выгрузки. Перемешивание бетонной смеси производится в течение 10 – 15 мин при частоте вращения барабана 8 – 12 об/мин.

Затворение сухой бетонной смеси на пористых заполнителях и перемешивание компонентов осуществляется в АБС в пути его следования на строительную площадку за 25 – 30 мин до прибытия на объект. При использовании водонасыщенных пористых заполнителей последовательность загрузки материалов в бетоносмесительный барабан АБС следующая: сначала водонасыщенный пористый заполнитель, плотный песок и затем цемент. Перед подачей воды затворения сыпучие материалы перемешивают в течение 3 – 5 мин. Воду затворения вводят из водяного бака АБС при частоте вращения барабана 6 – 10 об/мин. Продолжительность перемешивания для получения однородной легкогобетонной смеси составляет 15 – 20 мин.

Применяемые технология и средства доставки бетонных смесей при отрицательной температуре воздуха должны обеспечивать минимальные потери тепла в процессе транспортирования с завода смеси товарного бетона на строительную площадку. При температуре до -20°C используются АБС в обычном исполнении. Во избежание замерзания бетонной смеси транспортируют горячие смеси, вводят противоморозные добавки, используют сухие и частично приготовленные смеси с последующим затворением горячей водой. Продолжительность транспортирования готовой бетонной смеси с противоморозными добавками не должна превышать 30 мин. В качестве противоморозных добавок применяют НН, ННХК и др. Добавлять поташ, ускоряющий сроки схватывания цемента, однако резко снижающий подвижность смесей, нецелесообразно. Во избежание потери подвижности смеси при больших расстояниях доставки целесообразно транспортировать сухие смеси, которые готовят на объекте путем введения воды затворения с противоморозной добавкой и перемешиванием всех компонентов в барабане АБС.

При доставке горячих бетонных смесей необходимо следить за их температурой, которая сразу же после загрузки АБС не должна превышать 40°C . Для того чтобы потери тепла были минимальными, открытые части барабана АБС закрывают влагонепроницаемыми материалами (брезентом, листовой резиной) или деревянными щитами. Начальная температура смеси зависит от дальности транспортирования, а также от применяемых технологии и средств доставки.

При температурах ниже -20°C необходимо использовать специализированное оборудование - АБС в зимнем исполнении.

Во всех случаях при транспортировании бетонной смеси в условиях отрицательных температур допускается не более одной перегрузки из автотранспортных средств в бетоноукладочное оборудование. Место перегрузки должно быть защищено от ветра и атмосферных осадков. С этой целью могут быть использованы различные влагонепроницаемые материалы (брезент, листовая резина, полиэтиленовые пленки, синтетические материалы), а также деревянные щиты, конструкции из оцинкованного или кровельного железа и т.п. На строительной площадке предусматривают возможность получения горячей воды для промывки автотранспортных средств и затворения сухой и частично приготовленной смеси.

Для восстановления подвижности готовой бетонной смеси с суперпластификаторами может быть повторно введена эта же добавка в количестве 0,2 – 0,4 % по массе цемента в виде 15 %-го водного раствора непосредственно перед разгрузкой АБС. При этом продолжительность перемешивания готовой смеси с вновь введенным раствором суперпластификатора составляет не менее 5 мин. Этот технологический прием позволяет увеличивать подвижность бетонной смеси с 8 – 12 до 16 – 22 см с одновременным повышением прочности бетона на 10 – 20 %.

Пластифицирующий эффект достигается и при повторном перемешивании в течение 5 – 10 мин доставленных в АБС бетонных смесей на предварительно пропитанных растворами пластифицирующих добавок пористых заполнителях.

При доставке готовых бетонных смесей с воздухововлекающими добавками в результате воздействия динамических и вибрационных нагрузок происходит уменьшение воздуходержания смесей на 1,5 – 3 %, что необходимо учитывать при определении этого исходного показателя на заводе товарного бетона.

При транспортировании бетонных смесей на большие расстояния добавки вводятся вместе с частью воды затворения непосредственно перед перегрузкой в бетоноукладочное оборудование. Для удлинения срока схватывания цементного теста в частично приготовленную жесткую смесь вводятся добавки - замедлители схватывания. Добавки вводятся из дозирочного бака АБС или смесителя-перегрузжателя в процессе перемешивания бетонной смеси. Для равномерного распределения раствора добавки по всему объёму доставляемой смеси его подачу из дозирочного бака и впрыскивание осуществляют с помощью сжатого воздуха, подаваемого, например, от ресивера для подкачки шин АБС. Продолжительность пере-

мешивания бетонной смеси после введения добавки должна быть не менее 10 мин при приготовлении в АБС и смесителях-перегрузателях барабанного типа и не менее 5 мин - в смесителях-перегрузателях конвейерного типа.

При транспортировании сухих бетонных смесей добавки вводятся вместе с водой затворения в пути следования АБС или непосредственно перед его разгрузкой. При этом первоначально вводится 0,8 – 0,85 воды затворения и производится перемешивание бетонной смеси в течение 15 – 20 мин, а затем из дозирочного бака добавляется раствор добавки и смесь перемешивается в течение 5 – 7 мин при максимальной частоте вращения барабана АБС.

2.2. Транспортирование, подача и укладка бетонных смесей автобетононасосом

Высокие требования к качеству бетонной смеси – гарантия надежной эксплуатации АБН. Жесткие малоподвижные бетонные смеси, а также литые несвязные для перекачивания по трубопроводам не пригодны, так как в этих случаях в трубопроводах могут образовываться пробки.

При перекачивании малоподвижных смесей пробки образуются за счет сопротивления перемещению (трение), превышающего величину давления, развиваемого бетононасосом, при перемещении смесей литых - в результате их расслаивания. Кроме того, литой бетон не может транспортироваться по вертикали (он одинаково легко течет как в направлении подачи, так и в обратном). Транспортировка литой смеси сопровождается характерным треском (пульсацией) в трубопроводе, который соответствует гидравлическим ударам при каждом новом продвижении массы бетона.

Бетонная смесь, предназначенная для перекачки по трубопроводам, подбирается расчетно-экспериментальным путем. Гранулометрический состав, пластичность и однородность смеси должны обеспечивать проектные характеристики бетона конструкции (прочность, водонепроницаемость, морозостойкость и т.д.). Состав бетонной смеси с учетом ее удобоукладываемости определяется строительной лабораторией.

Анализ практической работы АБН показал, что бетонные смеси предпочтительнее готовить на портландцементе с нормальным или замедленным сроками схватывания. По возможности смеси должны быть пластифицированными. Минимальный расход цемента без добавок подбирается из расчета не менее 300 кг/м^3 при классе бетона В20.

В качестве крупного заполнителя лучше применять гравий. Использование щебня ухудшает перемещение бетонной смеси по трубопроводу и приводит к ускоренному износу бетононасоса. Рекомендуемый размер крупного заполнителя не должен превышать 20 мм, если другие требования не указаны в паспорте механизма.

При выборе крупного заполнителя необходимо учитывать его абсорбирующую способность. Бетонная смесь, изготовленная на известковом щебне, обладает меньшей подвижностью и удобоперекачиваемостью, чем бетонная смесь, приготовленная на щебне твердых пород при равных расходах цемента и воды.

Количество пылевидной части песка крупностью до 0,15 мм рекомендуется доводить до 5 %, а мелкого песка крупностью до 0,3 мм - в пределах 20 % от общей массы песка. Добавление в бетонную смесь пылевидного и мелкого песка сверх указанного количества может привести к образованию пробок в бетоноводе из-за “отощания” смеси.

Исследования показали, что бетонные смеси должны содержать от 32 до 45 % мелких (песчаная мелочь и пылевидные частицы) и крупных заполнителей (гравия до 55 % или щебня до 60 - 65 % по весу от их общего количества).

В состав бетонной смеси с крупным заполнителем должно входить такое количество цементного теста, микрозаполнителей и растворной составляющей, при котором не только заполнялись бы пустоты в песке, щебне (гравии) и обволакивались зерна, но и обеспечивалась бы их некоторая раздвижка.

Расчет удобоукладываемости бетонной смеси по трубопроводам может выполняться в такой последовательности:

а) определяется объем компонентов бетонной смеси по следующим формулам:

объем цементного теста, л

$$V_m = V_w + B_w,$$

где B_w - объем воды, необходимой для образования коллоидной пленки на частицах цемента при его затворении, л,

$$B_w = B - 0,01 [C + S (G)];$$

где C ; P ; $S (G)$ - массы цемента, песка, щебня (гравия) соответственно, кг.

Объем цементного раствора

$$V_p = V_m + V_n.$$

Объем бетонной смеси, л,

$$V_B = V_p + V_{щ(г)},$$

где V_u , V_n , $V_{щ(г)}$, B - объемы соответственно цемента, песка, щебня (гравия) и воды, л;

Нормальная плотность цементного теста изменяется в пределах $k_{н.з.} = 0,19 - 0,33$;

б) определяются количественные и качественные параметры удобоукладываемости бетонной смеси:

$$X_u = \frac{B_u}{Ц \cdot K_{н.з.}}; \quad X_n = \frac{V_r}{V_p \cdot П_n}; \quad X_{щ} = \frac{V_p}{V_B \cdot П_{щ(г)}},$$

где X_u - содержание воды в цементе; $\frac{B_u}{Ц}$ - водоцементное отношение цементного теста; X_n - степень заполнения пустот в песке цементным тестом; $П_n$ - коэффициент пустотности песка; $X_{щ}$ - степень заполнения пустот в щебне (гравии) цементным раствором; $П_{щ(г)}$ - коэффициент пустотности щебня (гравия).

Между X_u , X_n , $X_{щ(г)}$ существуют зависимости, определяющие пригодность растворяемых и бетонных смесей для подачи по трубам.

Для транспортабельных бетонных смесей необходимо, чтобы значения X_u , X_n , $X_{щ(г)}$ пересекались внутри многоугольников (рис. 2.1).

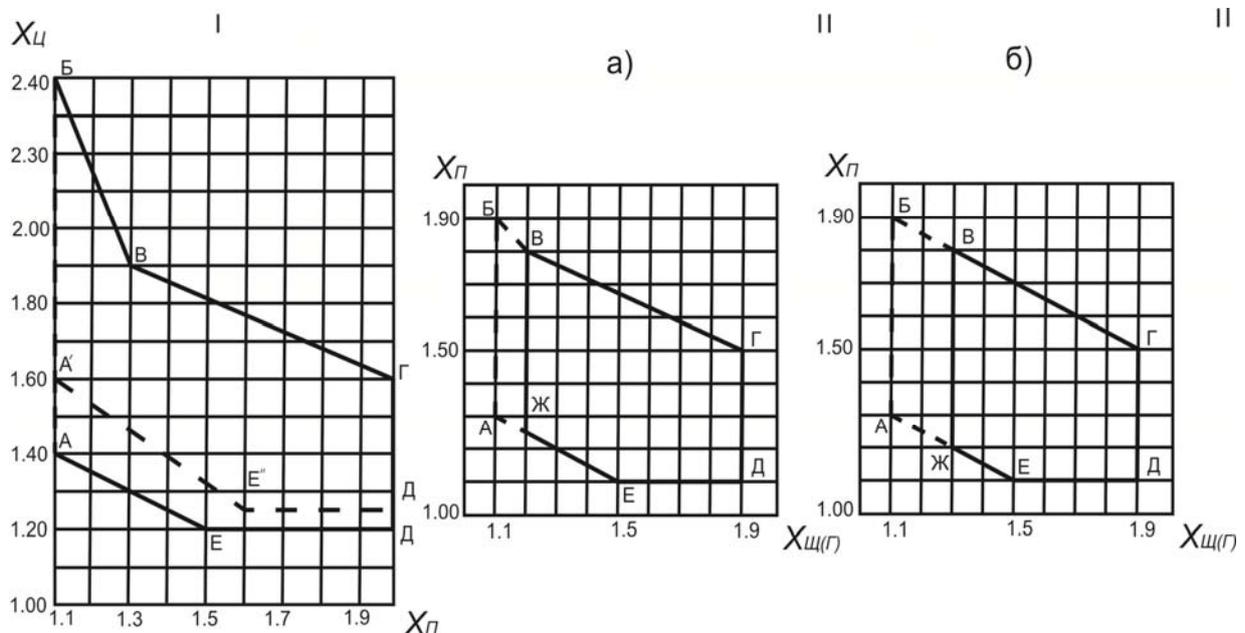


Рис. 2.1. Взаимосвязь характеристик бетонных смесей, пригодных для подачи: по I – трубопроводам: X_u и X_n (многоугольник АБВГДЕ соответствует значениям X_u и X_n при установившемся движении; А'В'Г'Д'Е' - при неустановившемся движении); II - трубам диаметром 100 мм (а) и диаметром 150 мм (б) – $X_{щ(г)}$ и X_n

Перекачиваемость бетонных смесей может быть улучшена за счет применения пластифицирующих добавок. Рекомендуется применять следующие добавки [119]:

- суперпластификаторы С-3, МФ-АР, 10-03, 40-03, 50-03;
- пластификаторы НИП-20, СДБ, ЛСТМ-2, НККОД и др.

Укладка бетонной смеси включает процессы приемки, подачи смеси к месту укладки и распределения ее в бетонируемой конструкции.

Основные характеристики и ориентировочные составы бетонных смесей, пригодных для транспортирования по трубопроводам АБН, приведены в табл. 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2

Основные характеристики бетонных смесей

| Диаметр крупного заполнителя, мм | Диаметр трубопроводов, мм | |
|----------------------------------|---------------------------|---------|
| | 100 | 150 |
| | Процент | |
| 5 - 10 | 40 - 60 | 30 - 40 |
| 10 - 20 | 40 - 60 | 50 - 60 |
| 20 - 40 | - | до 10 |

Перед началом бетонирования определяют: способы подачи, распределения и уплотнения бетонной смеси; состав бетонной смеси и показатели ее подвижности; толщину и направление укладываемых слоев; допустимую продолжительность перекрытия слоев; необходимую интенсивность подачи бетонной смеси с проверкой обеспеченности ее поставки бетонными заводами и транспортными средствами; потребность в механизмах и рабочих для подачи, распределения и уплотнения бетонной смеси, а также для производства необходимых подсобных работ в процессе бетонирования.

Таблица 2.3

Состав бетонных смесей

| Характеристика бетонной смеси | Единица измерения | Диаметр трубопроводов, мм | |
|-------------------------------|-------------------|---------------------------|-------------|
| | | 100 | 150 |
| Расход цемента | кг/м ³ | 300 - 400 | 300 - 400 |
| Расход песка | кг/м ³ | 730 - 1000 | 600 - 800 |
| Расход щебня (гравия) | кг/м ³ | 850 - 1050 | 1000 - 1200 |
| $\frac{Ц}{Ц+Щ(Г)}$ | - | 0,4 - 0,7 | 0,32 - 0,45 |
| Осадка стандартного конуса | см | 8 - 14 | 6 - 14 |

Перед укладкой бетонной смеси проверяют и принимают:

- все конструктивные элементы и работы, которые закрываются в процессе укладки бетонной смеси (подготовка оснований гидроизоляции, армирование, закладные детали и т.п.);
- правильность установки и надлежащее закрепление опалубки и поддерживающих ее конструкций;
- готовность к работе всех средств механизации укладки бетонной смеси.

Метод подачи бетонной смеси в конструкцию для конкретных условий определяется проектом производства работ. Выбор варианта определяют по следующим показателям: количеству бетона, укладываемого в смену или сутки, затратам труда и стоимости укладки смеси.

Укладку бетонных смесей АБН следует рассматривать как комплексный процесс, включающий приемку, подачу и распределение смеси, при котором выполняют следующие операции: монтаж и демонтаж дополнительного бетонопровода при необходимости, установку средств для распределения бетонной смеси, подготовку к эксплуатации АБН, транспортирование бетонной смеси по трубам, ликвидацию пробок в случае их образования в процессе перекачивания смеси, очистку оборудования в конце работы.

В схеме прокладки бетонопровода от бетононасоса до места укладки смеси стремятся добиться минимального числа поворотных участков и иметь минимально допустимую для конкретных условий строительства протяженность. Бетонопровод монтируется таким образом, чтобы он не мешал установке опалубки, арматуры, закладных частей, а также выполнению других смежных работ. Горизонтальные участки бетонопровода монтируют с небольшим уклоном в сторону участка, предназначенного для спуска воды после промывки. При необходимости плавно изменять длину бетонопровода в процессе перекачивания бетонной смеси в схеме трубопроводов предусматривают компенсатор, который выполняют из системы инвентарных колен под углом 90° и прямых звеньев.

Причины образования пробок при перекачивании бетонных смесей по трубам:

- неправильный подбор состава бетонной смеси, при котором не обеспечивается ее удобоперекачиваемость;
- использование расслоившейся, плохо перемешанной либо начавшей схватываться смеси;
- недостаточная смазка трубопровода пусковой смесью;

- недостаточное давление АБН для преодоления сопротивления перекачиванию;
- утечка цементного молока в местах соединения звеньев бетонопровода;
- неудовлетворительная очистка и промывка трубопровода;
- сильный нагрев бетонопровода;
- примерзание смеси к стенкам трубопровода в зимнее время;
- изношенность резиновой манжеты рабочего поршня бетононасоса, приводящая к попаданию промывочной воды в смесь при всасывании и отжатию цементного теста из смеси при нагнетании.

Типичный признак начала образования пробки в трубопроводе – повышение давления в гидросистеме АБН, а затем его внезапная остановка. В этом случае прекращают приемку бетонной смеси в бункер АБН и путем реверсирования пытаются откачать смесь из бетононасоса. После дополнительного перемешивания смеси в приемном бункере можно продолжать ее перекачивание. Не рекомендуется проталкивать пробку путем увеличения давления в системе гидропривода. Это ведет лишь к дальнейшему уплотнению бетонной смеси, увеличению размеров пробки, а иногда и к аварии установки. Если откачивание и повторное перемешивание не дают результата, применяют меры для удаления пробки: очищают не только звенья, в которых произошла закупорка, но и одно-два звена, следующих за пробкой по направлению движения.

Очистка бетонопровода и АБН – одна из ответственных операций, которая производится в соответствии с указаниями по эксплуатации применяемого оборудования по окончании бетонирования или рабочей смены, а также при каждом длительном перерыве в работе. Бетонопровод очищают, прогоняя инвентарные пыжи с помощью сжатого воздуха или воды. Бункер и цилиндропоршневая группа бетононасоса промываются водой.

При бетонировании монолитных конструкций при отрицательных температурах до начала укладки бетонной смеси опалубку и арматуру очищают от снега и наледи с помощью струи горячего воздуха или укрывая водонепроницаемыми материалами (полиэтиленовой пленкой, брезентом и т.п.), оттаивая и высушивая поверхности палубы арматурных изделий.

Способ и режимы (интенсивность, последовательность и т.п.) укладки смеси назначают в зависимости от температуры уложенной бетонной

смеси к началу выдерживания или термообработки бетона, которые должны быть не менее:

- температуры, установленной расчетом при использовании метода термоса;
- температуры замерзания воды затворения, увеличенной на 5 °С при использовании противоморозных добавок;
- 0 °С в наиболее охлажденных зонах при использовании предварительного электроразогрева бетонной смеси;
- температуры, установленной расчетом при использовании других методов зимнего бетонирования.

Следует применять такие способы, которые обеспечивают минимальные потери в процессе приемки и подачи бетонной смеси.

Применение современных бетононасосных установок позволяет изолировать бетонную смесь при ее укладке в конструкции от воздействия ветра и атмосферных осадков, а также улучшить температурный режим приемки, подачи и распределения. В качестве нагнетательного оборудования при температуре воздуха до – 15 °С может быть использован АБН в обычном (летнем) исполнении. В этом случае для перекачивания по трубам используют горячие бетонные смеси (30 – 35 °С) или смеси с противоморозными добавками. Для обеспечения удобоперекачиваемости легкобетонных смесей пористые заполнители насыщают раствором нитрита натрия.

Перед началом операции по перекачиванию бетонной смеси выполняют следующие мероприятия: оборудуют приемный бункер бетононасоса утепленной крышкой, заливают горячую воду в промывочный бак АБН; запускают гидравлическую систему АБН на холостом ходу при минимальных оборотах двигателя и, поддерживая данный режим работы гидронасоса в течение 10 – 15 мин, разогревают масло в гидроприводе насоса; прогревают бункер, транспортные цилиндры и бетонопровод АБН горячей водой (40 – 50 °С); подают в бункер пусковой раствор с температурой 30 – 40 °С и выполняют три – четыре цикла нагнетания и отсасывания при работающем побудительном шнеке.

После выполнения подготовительных операций приступают к перекачиванию бетонной смеси. Температура поступающей в бункер насоса смеси (без противоморозных добавок) должна быть не ниже 20 °С. В процессе перекачивания периодически добавляют в промывочный бак воду с

температурой не ниже 20°C. Во время ожидания разгрузки АБС бункер АБН закрывают утепленной крышкой. При вынужденных перерывах в работе бетонная смесь, находящаяся внутри бетонопровода, поддерживается в движении. Для этого может быть применен рециркулярный режим перекачивания, то есть переменное нагнетание и отсасывание смеси. При этом необходимо постоянно контролировать температуру бетонной смеси в приемном бункере, которая не должна опускаться ниже 10 °С. При достижении этого критического значения бетонную смесь удаляют из бетонопровода и бетононасосную установку промывают и очищают. Для промывки бетонопровода бункера и транспортных цилиндров используют горячую воду с температурой не менее 30 °С. Оставшуюся в промывочном и водяном баках воду сливают, а скопление воды в транспортных цилиндрах, бункере и бетонопроводе удаляют с помощью сжатого воздуха, подаваемого от компрессора бетононасоса.

При температуре окружающего воздуха ниже –15 °С применяют специализированное бетононасосное оборудование в зимнем исполнении, основные узлы и агрегаты которого утеплены.

Укладку бетонной смеси ведут непрерывно. В случае возникновения перерывов поверхность бетона укрывают, утепляют, а при необходимости и обогревают. Послойное бетонирование массивных монолитных конструкций ведут так, чтобы температура бетона в уложенном слое до перекрытия его следующим не опускалась ниже предусмотренной расчетом. Все открытые поверхности укладываемого бетона после окончания бетонирования укрывают пароизоляционными материалами (полимерной пленкой, рубероидом и т.п.) и утепляют в соответствии с режимом выдерживания бетона.

Основное требование к средствам подачи при укладке высокоподвижных и литых бетонных смесей – сохранение удобоукладываемости и однородности бетонной смеси на месте укладки. Для этого используют оборудование и механизмы, исключаящие потери жидкой фазы и промежуточные перегрузки смеси.

Особенность процесса транспортирования по трубам бетонных смесей с суперпластификаторами – уменьшение их подвижности в зависимости от давления и продолжительности перекачивания, а также температуры смеси, поэтому перерывы в подаче высокоподвижных и литых бетонных смесей с суперпластификаторами не должны превышать 20 мин.

При применении АБН необходимо обеспечить требуемое техническое состояние узлов, механизмов и приборов машин, влияющих на безопасность движения. Эксплуатация автономной, распределительной стрелы допускается на высоте до 100 м. Для производства работ в ночное время необходимо обеспечить стрелу выносным источником света для освещения места укладки бетона [2].

§ 2.3. Технологические комплексы автобетоносмеситель – автобетононасос

Бетонную смесь в монолитные конструкции подают и распределяют с помощью АБН в комплекте с необходимым количеством АБС, обеспечивающих ритмичную поставку бетонной смеси на объект.

Количество и состав машин для транспортировки и укладки бетонной смеси в конструкции определяются в зависимости от объема работ и конкретных условий объекта строительства.

Применение комплекта машин эффективно при необходимости транспортировки, подачи и распределения бетонной смеси в монолитные конструкции в значительных объемах и при интенсивном ведении бетонных работ.

Следует особо отметить возможность использования комплекта машин при подаче и распределении бетонной смеси в монолитные конструкции при реконструкции действующих предприятий, а также в конструкции, находящиеся в условиях смонтированного каркаса, через оконные и монтажные проемы и другие труднодоступные места.

Комплект машин по транспортировке и укладке бетонных смесей в конструкции состоит из АБС и АБН. Состав комплекта устанавливается проектом производства работ. Технические характеристики АБС и АБН для их подбора при совместной работе приведены в [7].

АБН оснащен шарнирно-сочлененной распределительной стрелой, на которой укреплен бетоновод. С помощью этой стрелы с одной стоянки АБН бетон может быть подан в любую точку зоны работы. Фактические характеристики АБН оцениваются после проведения ежегодных испытаний по специально разработанным программам.

Для подачи бетона на расстояние, превышающее указанное в [7], монтируют стационарный бетоновод из инвентарных стальных труб на быстроразъемных соединениях. Пример схемы подачи и распределения бетонной смеси представлен на рис. 2.2.

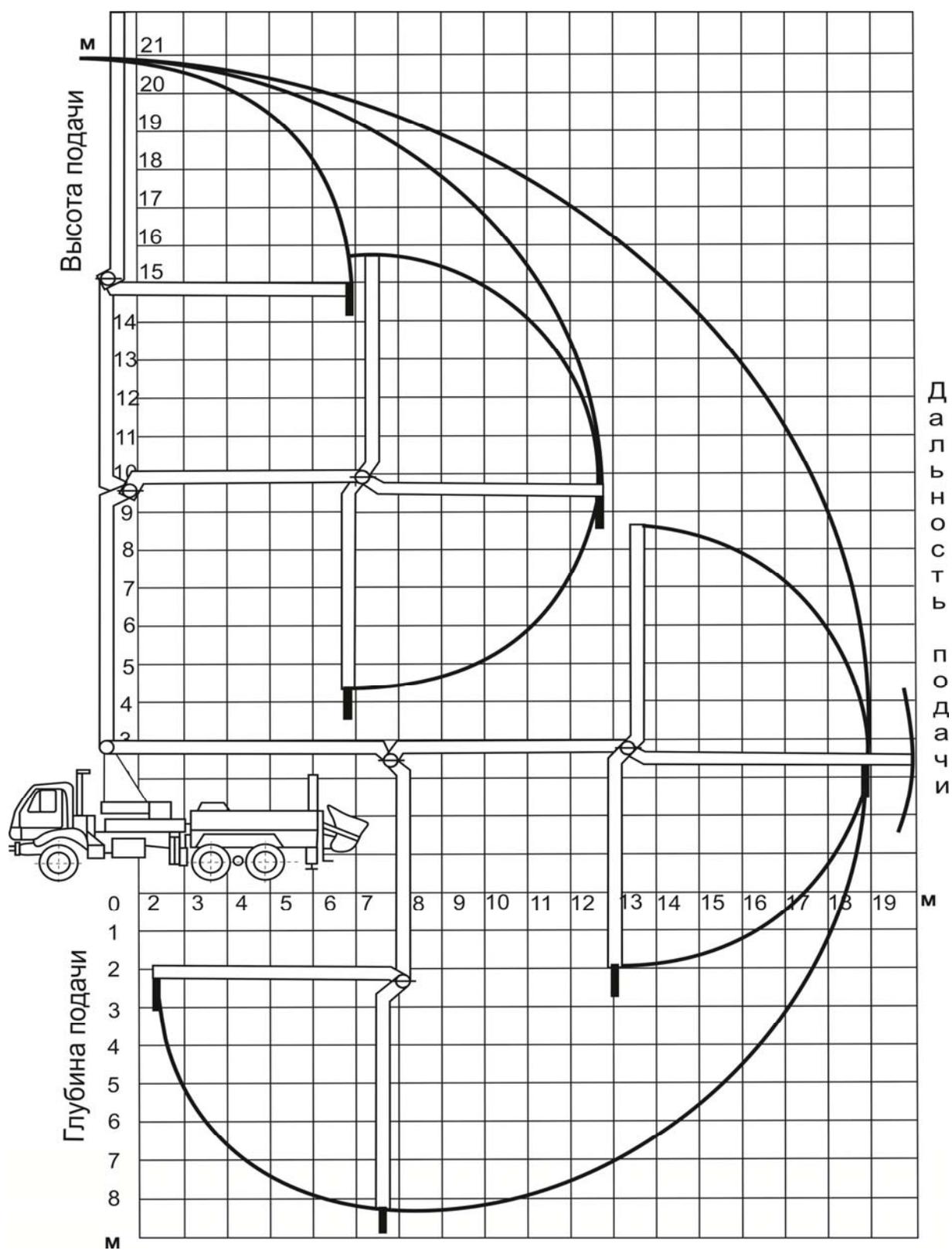


Рис. 2.2. Рабочая зона распределительной стрелы АБН СБ-170-1 (170-1А) в вертикальной плоскости

§ 2.4. Особенности использования автобетоносмесителей и автобетононасосов при отрицательной температуре наружного воздуха

В начале авторских исследований проблемы бетонирования монолитных конструкций при отрицательной температуре бетонными смесями, разогретыми паром в смесительных барабанах АБС, вопросы приготовления бетонной смеси в АБС и ее транспортирования при отрицательной температуре воздуха фактически не были решены, несмотря на то что нет ограничений в эксплуатации АБС до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При низких температурах перевозка бетонной смеси АБС прекращалась и многочисленный парк высокопроизводительных механизмов простаивал в течение нескольких месяцев (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Применение АБС в зимнее время

В Руководстве по производству бетонных работ в зимних условиях [54], вышедшем в 1982 году, отсутствовало какое-либо упоминание об АБС, не говоря уже об эксплуатации их зимой.

Для использования АБС при отрицательной температуре предлагался ряд мероприятий конструктивного и технологического характера. Ю.М. Слесарев и С.А. Якушев [6] рекомендовали смесительное оборудование делать съемным, чтобы уменьшить простои базового автомобиля в зимнее время, устанавливая бортовую платформу.

С целью снижения потерь тепла при транспортировании бетонной смеси предлагалось отверстие смесительного барабана закрывать крышкой посредством смонтированной на раме транспортного средства подвижной рамки [120].

Западногерманская фирма «Штеттер» изготавливала АБС типа АМ 6 СХТ, допускающие эксплуатацию их до температуры -40 °С. На машине устанавливался теплоизолированный барабан, загрузочно-разгрузочное отверстие закрывалось крышкой, несущие элементы были выполнены из специальных сталей [121].

Одни рекомендовали перевозить бетонную смесь в зимних условиях в бетоносмесителях с утепленной горловиной и теплоизоляционной крышкой или обогревать горловину отработанными газами от двигателя [1].

Другие предлагали для расширения эксплуатационных возможностей АБС обеспечивать стабилизацию температурного режима по всему объему транспортируемой бетонной смеси, снабдив смесительный барабан двойной обшивкой для образования полости с выпускными отверстиями для подвода и отвода термореактивного вещества. В порожний смесительный барабан из системы подачи, размещенной на шасси, подается термоактивное вещество, разогретое выхлопными газами, во внутреннюю полость и разогревает обшивку; при загруженном смесительном барабане выхлопные газы подаются в наружную полость, при этом внутренняя полость изолирована и играет роль воздушного термоизолятора по отношению к перевозимой смеси, не допускающего ее перегрева [122].

Третьи видят выход в том, что смесительный барабан снабжается кожухом, соединенным с источником тепла, например выхлопной трубой двигателя внутреннего сгорания, и емкостью для вяжущего. Заполнители и вода разогреваются до необходимой температуры перед загрузкой на бетоносмесительном узле, в процессе транспортирования они обогреваются выхлопными газами, за 5 – 10 мин до выезда на строительную площадку вяжущее из емкости перегружается в смесительный барабан и смесь перемешивается [123].

Для сохранения температуры бетонной смеси в смесительном барабане загрузочно-разгрузочное устройство и приспособление для дозирования воды предлагается конструировать с объемлющими их термическими камерами, соединенными с системой подогрева. Термическая камера загрузочно-разгрузочного устройства снабжена кольцевым уплотнителем, встроенным между задней стенкой термической камеры и поверхностью

смесительного барабана, выполненного с двойными стенками, между которыми помещен теплоизоляционный слой. Загрузка производится через люк в термической камере, после чего он закрывается и АБС направляется к месту разгрузки, при этом в пути следования включаются привод смесительного барабана и воздушные отопители, от которых теплый воздух подается внутрь смесительного барабана с одновременным регулированием температуры в термической камере [124].

Существовала группа предложений по подогреву компонентов в процессе транспортирования. Предлагалось устройство для их подогрева выполнять в виде объемлющего барабан кожуха, закрепленного на поворотной траверсе, на которой смонтированы пламенные горелки, расположенные внутри кожуха под барабаном. На специализированной установке или бетонном заводе, приспособленном для выдачи сухих смесей, в смесительный барабан АБС загружают отдозированное количество вяжущих и заполнителей, после чего туда же по месту загрузки либо при длительном транспортировании перед началом нагрева заливают при помощи сжатого воздуха порцию подогретой воды из бака и включают насос, вентилятор и поджигают горелки с одновременным включением привода вращения смесительного барабана. В процессе перемешивания смеси происходит контактный нагрев смеси, а отходящие газы на выходе вентилятора используются для подогрева воды в баке [125].

В одном из вариантов приготовления бетонной смеси в зимнее время в качестве теплоносителя используется пар [126]. Смесительный барабан снабжается паровой рубашкой, соединенной с установленным на раме пароводяным теплогенератором. За период холостого пробега предварительно залитая в смесительный барабан АБС порция воды нагревается до температуры 60 – 90 °С проходящим по паровой рубашке паром, после чего туда же загружается только порция заполнителя, а отдозированная порция вяжущего загружается и транспортируется в воронке АБС и после прибытия на объект засыпается в смесительный барабан, где уже находятся нагретые за время движения вода и заполнители. После дополнительного перемешивания в течение 1 мин готовая бетонная смесь выгружается.

После начала работ с пароразогревом бетонной смеси в АБС, они были переоборудованы и под электроразогрев смеси. Принципиальные решения, высказанные автором в 1982 году [127], впоследствии были реализованы М.Я. Буриком [128].

Особенность производства работ по укладке бетонной смеси при отрицательных температурах воздуха – необходимость выполнения мероприятий, обеспечивающих минимальные потери тепла бетонной смеси от момента ее приготовления до укладки в опалубку конструкции, а также обеспечение заданной температуры смеси при ее укладке.

По данным ЦНИИОМТП транспортирование бетонной смеси от смесительного узла до места укладки бетона в опалубку при температуре наружного воздуха до – 15 °С можно осуществлять в АБС и АБН обычного (летнего) исполнения, без утепления, но с обязательной очисткой барабанов и бункеров от льда и снега. При температуре наружного воздуха ниже –15 °С барабаны АБС, бункера АБН и бетоноводы должны быть утеплены.

Утепление может быть выполнено с помощью эффективных теплоизоляционных материалов, проложенных между барабаном, бункером и легким металлическим кожухом.

При транспортировании смеси допускается не более одной перегрузки - из АБС в бункер бетононасоса. Место перегрузки должно быть защищено от ветра, бункер рекомендуется защищать от атмосферных осадков.

При подготовке АБН к эксплуатации в зимнее время выполняются мероприятия по обеспечению работы их основных узлов, водяной и масляной систем. Исключается контакт наиболее уязвимых узлов АБН (транспортных и масляных цилиндров, баков для воды и масла, трубопроводов маслогидравлической системы и т.д.) с холодным воздухом.

Температура бетонной смеси при загрузке в барабан АБС на бетонном заводе должна быть не менее 10 °С, но не более 40 °С; она определяется расчетным путем по следующей формуле:

$$t_{cm} = \frac{t_{\delta.n.} - t_{н.в.} \sum \Delta t_{mp}}{1 - \sum \Delta t_{mp}},$$

где $t_{\delta.n.}$ - начальная температура бетона после укладки в опалубку (определяется в зависимости от способа выдерживания бетона), °С; $t_{н.в.}$ - температура наружного воздуха, °С; $\sum \Delta t_{mp}$ - суммарное снижение температуры бетонной смеси при всех операциях - от приемки с завода до укладки в конструкцию; Δt_{mp} - относительное снижение температуры бетонной смеси на каждой операции (при транспортировании, перегрузке, укладке и др.) при перепаде между температурой наружного воздуха и температурой бетонной смеси в 1 °С;

$$\Delta t_{mp} = \tau \cdot \Delta t_y,$$

где τ - продолжительность укладки смеси, мин; Δt_y - снижение температуры смеси при укладке, градус на 1 градус в минуту (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Снижение температуры смеси при укладке

| Температура смеси при укладке | Толщина конструкции, мм |
|-------------------------------|-------------------------|
| 0,03 | 60 |
| 0,018 | 100 |
| 0,012 | 150 |
| 0,09 | 200 |
| 0,007 | 300 |
| 0,005 | 400 |
| 0,004 | 500 |
| 0,003 | 700 |

В начальный момент работы АБН температура пускового раствора и первых порций бетонной смеси в объеме, достаточном для заполнения бетоновода по всей его длине, устанавливается в зависимости от температуры наружного воздуха не ниже 30 – 40 °С.

Непосредственно перед началом транспортирования бетонной смеси трубопровод прогревается горячей водой, паром или теплым воздухом.

Средняя температура бетонной смеси в процессе транспортирования по трубопроводу, включая периоды остановки бетононасоса, не может опускаться ниже величин, обеспечивающих необходимую температуру бетонной смеси, укладываемой в конструкцию.

Возможно транспортирование бетонной смеси с противоморозными добавками нитрата натрия NaNO_2 . Транспортирование бетонных смесей с добавками хлористых солей не допускается во избежание интенсивной коррозии деталей бетононасоса и трубопроводов. Не рекомендуется также применение поташа, который способствует быстрому загустеванию бетонной смеси.

При транспортировании бетонной смеси по неутепленному трубопроводу остановка АБН допускается не более 15 мин. При более длительной остановке применяют меры для удаления бетонной смеси из трубопровода. В случае утепленного трубопровода допускается остановка АБН на 20 - 30 мин.

Очистку бункера АБН и трубопровода производят подогретой водой, после чего оставшуюся воду полностью удаляют.

Для использования АБС и АБН при отрицательной температуре выполняется ряд мероприятий конструктивного и технологического характе-

ра. Процесс бетонирования конструкций в зимнее время с применением бетононасосных установок предусматривает мероприятия по уменьшению теплопотерь бетонных смесей:

- при транспортировании от бетоносмесительной установки к бетононасосу;
- перегрузке в приемный бункер бетононасоса;
- перекачивании по трубам.

В случае транспортирования бетонной смеси от смесительных узлов при температуре ниже -15°C барабаны АБС утепляются или оборудуются устройствами для обогрева. Утепление может выполняться с помощью эффективных теплоизоляционных материалов – минераловатных матов, пенопласта, поропласта, пенополиуретана и т.п., проложенных между барабаном или кузовом и легким металлическим кожухом. В качестве теплоносителя при обогреве могут использоваться отработанные газы от двигателя автомобиля в смеси с наружным воздухом, подаваемые в полость между барабаном и металлическим кожухом. Загрузочное отверстие барабана АБС закрывается, а бак для воды и система водонапорных труб утепляются.

В зависимости от температуры воздуха, длины и диаметра трубопровода, температуры смеси, производительности АБН транспортирование смеси в зимних условиях осуществляется по неутепленным, утепленным или обогреваемым трубопроводам.

При выборе типа трубопровода из числа перечисленных руководствуются следующими положениями:

- транспортирование бетонных смесей по неутепленным трубопроводам не требует дополнительных затрат на устройство и эксплуатацию трубопровода по сравнению с летними условиями, однако, имеет ограниченную область применения по температуре воздуха и длине трубопровода. Не рекомендуется остановка насоса продолжительностью свыше 15 мин. При более длительной остановке принимаются меры для удаления бетонной смеси из трубопровода;

- транспортирование бетонных смесей по утепленным трубопроводам требует небольших дополнительных затрат на теплоизоляцию по сравнению с транспортированием по неутепленным трубопроводам, но имеет более широкую область применения по температуре воздуха и длине трубопровода. Допускается остановка бетононасоса продолжительностью 20 - 30 мин;

- транспортирование бетонных смесей по обогреваемым утепленным трубопроводам требует специальных электронагревательных элементов,

значительных первоначальных затрат на устройство утепления и эксплуатационных затрат на электроэнергию, однако, эти мероприятия обеспечивают условия транспортирования бетонной смеси, не отличающиеся от летних [7].

Таким образом, если предложения по утеплению и обогреву бетоноводов АБН достаточны для обеспечения их круглогодичной работы, то все предлагаемые мероприятия в отношении АБС предусматривают предохранение бетонной смеси от замерзания или незначительно подогревают ее. При этом назначение АБС как активного технологического элемента, предназначенного для приготовления высококачественной бетонной смеси, утрачивается, и он используется как тара для перевозки готовой бетонной смеси.

§ 2.5. Организация производства

При разработке проекта производства работ (ППР) и производстве работ по возведению монолитных бетонных и железобетонных конструкций, выполняемых с использованием АБС и АБН, руководствуются следующими основными положениями.

Бетонную смесь в монолитные конструкции подают и распределяют с помощью АБН в комплекте с необходимым количеством АБС, обеспечивающих ритмичную поставку бетонной смеси на объект. Количество и состав машин для транспортировки и укладки бетонной смеси в конструкции определяются в ППР в зависимости от объема работ и конкретных условий объекта строительства. Применение АБН гарантирует высокое качество выполняемых работ по сооружению монолитных бетонных и железобетонных конструкций.

Бетонные смеси, предназначенные для последующей перекачки АБН, с предприятия-изготовителя транспортируют только в АБС. Фактическое расстояние от завода-изготовителя до объекта устанавливается контрольным хронометражем с оформлением акта.

Для исключения расслоения и снижения подвижности бетонной смеси во время транспортирования к объекту рекомендуется периодическое включение и выключение барабана АБС. Перед разгрузкой на стройплощадке необходимо перемешать бетонную смесь в барабане АБС при 10 - 12 об/мин в течение 3 мин.

Барабаны АБС необходимо промывать водой после каждой перевозки бетонной смеси и после каждой рабочей смены. С этой целью в разра-

батываемом ППР должно быть предусмотрено водоразборное устройство с гибким шлангом и место установки емкости для слива отходов. Объем сливаемых отходов зависит от типа АБС и составляет 200 - 350 л.

Полный цикл работы АБС состоит из следующих операций:

- загрузки смесителя готовой бетонной или сухой смесью и заправки бака для воды;
- транспортирования;
- подачи в смеситель необходимой порции воды при загрузке барабана сухой смесью и перемешивания или побуждения готовой бетонной смеси при транспортировании на дальние расстояния;
- разгрузки бетонной смеси;
- промывки смесителя и лотков.

Побуждение или перемешивание бетонной смеси в пути следования рекомендуется на прямых участках дороги с твердым покрытием. Большинство АБС имеют привод смесительного барабана от двигателя автомобиля, что не позволяет осуществлять перемешивание при движении в холмистой местности и горах. Однако существуют АБС (например, СБ-92В-2, СБ-172-1 с приводом смесительного барабана от автономного двигателя), рекомендуемые для эксплуатации в таких условиях.

По истечении 120 машино-часов работы АБС осматривается внутренняя полость барабана и в случае обнаружения налипшего на лопасти или на стенки затвердевшего бетона его очищают. При необходимости осуществляется подварка или наплавка износившихся кромок лопастей смесительного барабана.

Приказом по строительной организации устанавливается персональная ответственность лиц, обеспечивающих подготовку объекта к приему АБН и соблюдение требований техники безопасности при его эксплуатации.

Строительная организация обеспечивает:

- подготовку фронта работ с учетом принятого в ППР темпа укладки бетонной смеси АБН;
- соблюдение требований техники безопасности и охраны труда при работе АБН;
- подготовку резервного фронта работ по укладке бетонной смеси, выгруженной из АБС, в случае непредвиденной или аварийной остановки АБН;
- своевременное оформление необходимой документации для получения с заводов бетонной смеси с заданными характеристиками и в необходимых объемах;

- выделение бригады специалистов для подготовки мест стоянок АБН, оборудования стоянок водоразборными устройствами для промывки насосов и барабанов АБС, установки АБН в рабочее положение, монтажа и демонтажа бетоноводов (при необходимости), устранения пробок в бетоноводах, укладки и распределения бетонной смеси в конструкциях, контроля за состоянием опалубки в процессе укладки бетонной смеси, приведения АБН в транспортное положение (количественный и квалификационный состав бригады устанавливается в ППР);

- проведение инструктажа на рабочем месте с рабочими бригады, выделенными для работы с комплектом машин;

- разработку графика работы членов бригады, работающих с АБН, исключая все перерывы (в том числе и обеденный).

В целях повышения эффективности использования комплекта машин при длительной их работе на объекте строительная организация, по согласованию с владельцем механизмов, организует постоянное пребывание АБН на объекте и обеспечивает его охрану.

Подача и распределение бетонной смеси по бетоноводу стрелы осуществляется только при устойчивом положении АБН. Места стоянок и маршрут передвижения АБН и АБС на строительной площадке устраиваются в соответствии с ППР из дорожных плит, уложенных по горизонтально выровненной поверхности.

Размер площадки должен обеспечивать маневрирование АБН, размещение на ней не менее двух АБС и АБН.

Установка АБН на рабочей площадке разрешается при условии:

- обеспечения горизонтальности площадки для АБН;
- заготовки подкладок под аутригеры;
- заготовки цемента и воды для затворения цементного теста (для пусковой смеси);

- заготовки пыжей для прочистки бетоноводов;

- подготовки резервных мест для приема бетонной смеси из АБС.

Для обеспечения нормальной работы распределительных стрел АБН необходимы следующие мероприятия:

- установка АБН на подготовленную в соответствии с ППР площадку;
- установка и фиксация опорных стрел (аутригеров);
- включение гидравлической системы и развертывание распределительной стрелы;
- проверка работоспособности;

- перемещение распределительной стрелы к месту бетонирования или к месту подключения стационарного бетоновода.

Принцип действия распределительных стрел АБН основан на гидравлической системе управления. Стрелы трех-, четырехсекционные складываются в транспортное положение. Каждая из секций стрелы имеет заменяемую транспортирующую трубу, эти трубы соединены друг с другом в местах перегиба стрелы специальными отводами, как показано на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Сочленения секций стрелы АБН

В случаях, когда подача и распределение бетонной смеси в конструкции с помощью стрелы АБН невозможны, устраивают бетоноводы из бесшовных металлических труб. При этом прокладку бетоноводов осуществляют из инвентарных металлических труб в сочетании с бетоноводом стрелы АБН. Концевые участки бетоноводов выполняются только из резиноканевых распределительных шлангов, входящих в комплект АБН.

В связи с большой массой труб, заполненных бетонной смесью, горизонтальный участок бетоновода монтируется на прочных опорах (подкладки, козлы, подмости, леса, выдвижные трубчатые стойки и т.п.), исключающих провисание труб. Расстояние между опорами 2,5 - 3 м.

На вертикальных участках бетоновода каждое звено трубопровода закрепляется. Во избежание разрыва соединений не закрепляются или не укладываются на какие-либо опоры верхнее и нижнее колена стояка бетоновода.

Звенья трубопровода стыкуются на быстроразъемных инвентарных соединениях, обладающих прочностью и герметичностью, и при этом особое внимание уделяется устранению дефектов (трещин, отверстий и т.д.). Неплотности в соединении повышают опасность возникновения пробок.

При бетонировании конструкций, расположенных ниже уровня стоянки АБН, в наклонной части бетоновода, имеющего большую протяженность, рекомендуется встраивать колена или подпорные отводы, препятствующие отрыву бетонной смеси и расслоению ее на наклонном участке.

Углы поворотов трассы бетоноводов из металлических труб могут выполняться из инвентарных металлических отводов или из гибких резиноканевых шлангов.

Использование резиноканевых шлангов позволяет выполнить поворот трассы на любой угол от 0 до 90° при прохождении трассы по труднодоступным участкам и при пересечении различных преград.

Собирают, разбирают, промывают и хранят трубы бетоновода в соответствии с технологическими требованиями. Их окрашивают светлой краской, способной отражать тепло, а в жаркий период укрывают влажными матами, мешковиной и т.п.

Удобоперекачиваемость приготовленной заводом бетонной смеси оценивается представителями лабораторий строительной организации и завода-изготовителя с участием представителя управления механизации. По их требованию завод-изготовитель обязан внести коррективы в состав бетонной смеси, однако увеличение расхода цемента сверх нормативного в целях улучшения удобоперекачиваемости смеси недопустимо. При оптимальном гранулометрическом составе заполнителей расход цемента в бетонной смеси, перекачиваемой бетононасосами, не отличается от расхода цемента, необходимого для приготовления бетонных смесей, укладываемых другими способами.

Высокие требования к качеству бетонной смеси, перекачиваемой бетононасосами, вызывают необходимость тщательного производственного контроля за соответствием бетонной смеси, поступающей на строительную площадку, заданным характеристикам (отбор проб в момент загрузки бетонной смеси в приемный бункер бетононасоса и испытания).

При испытаниях определяется подвижность или жесткость бетонной смеси - основных факторов ее удобоукладываемости. Испытания проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 10181-2000 «Смеси бетонные. Методы испытаний».

Пробы бетонной смеси при производственном контроле отбирают:

- при отпуске товарной бетонной смеси - на месте ее приготовления при погрузке в транспортную емкость;
- при производстве работ - на месте укладки бетонной смеси.

Пробу бетонной смеси для испытаний при подаче АБН отбирают в три приема в случайные моменты времени в течение не более 10 минут.

Из объема отобранной пробы не менее двух раз определяют все контролируемые показатели качества бетонной смеси. Испытания бетонной смеси и изготовление контрольных образцов бетона начинается не позднее чем через 10 минут после отбора пробы.

Температура бетонной смеси от момента отбора пробы до момента окончания испытания не должна изменяться более чем на 5 °С. Хранят пробу бетонной смеси после ее отбора до момента испытания при условии исключения потери влаги или увлажнения.

Результаты определения качества бетонной смеси заносятся в журнал, в котором указываются:

- наименование организации-изготовителя смеси;
- наименование бетонной смеси по ГОСТ 7473-94 «Смеси бетонные. Технические условия»;
- наименование определяемого показателя качества;
- дата и время испытания;
- место отбора пробы;
- температура бетонной смеси;
- результаты частных определений отдельных показателей качества бетонной смеси и среднеарифметические результаты по каждому показателю.

Результаты испытаний контрольных образцов бетона изготовитель сообщает заказчику по его требованию не позднее чем через трое суток после проведения испытания.

Перед эксплуатацией АБН устанавливается на выносные опоры, проверяется работа всех механизмов, в том числе стрелы, устанавливаемой в раскрытом положении или подсоединяемой к стационарному бетоноводу.

Для снижения трения бетонной смеси о стенки бетоновода перед запуском АБН наносят на них смазочный слой из цементного раствора состава 1:2 (одна часть цемента, две части песка). Толщина слоя – от 2 до 5 мм – зависит от состава бетонной смеси и диаметра бетоновода.

Количество раствора, создающего к тому же полную герметичность в трубопроводе, зависит от длины бетоновода и от подвижности бетонной смеси. В среднем на каждый метр бетоновода требуется:

- 0,006 м³ - для бетоновода диаметром 150 мм;
- 0,005 м³ - диаметром 125 мм;
- 0,004 м³ - диаметром 100 мм.

Фактический объем раствора, необходимый для смазки бетоновода, в зависимости от его длины, диаметра и расположения (вертикального, наклонного, горизонтального), а также от подвижности бетонной смеси уточняется опытным путем.

Раствор можно приготовить в АБС или в бункере АБН. Например, приготовление цементного раствора состава 1:2 в объеме, необходимом для смазки внутренней поверхности 50 м бетоновода диаметром 150 мм ($0,006 \times 50 = 0,3 \text{ м}^3$), может осуществляться в бункере АБН. При водоцементном отношении В/Ц = 0,45 на $0,3 \text{ м}^3$ раствора потребуется 87 кг цемента, 174 кг песка и 39 л воды.

Цементный раствор в бункере АБН приготавливают в следующей последовательности:

- в бункер засыпают 40 кг песка и 40 кг цемента (водоцементное отношение раствора не должно превышать величины В/Ц = 0,45);
- постепенно добавляют воду в правую часть бункера, а затем включают мешалку в режиме вращения в обратном направлении. Компоненты перемешиваются до тех пор, пока не образуется жидкий состав;
- добавляют 47 кг цемента, постоянно добавляют воду;
- оставшиеся 134 кг песка добавляют в бункер постепенно, постоянно перемешивая до тех пор, пока песок не распределится в смеси равномерно, при этом смесь поддерживается в жидком состоянии;
- перед перекачиванием бетонной смеси изменяют направление вращения мешалки, чтобы раствор переместился в горловину бункера;
- одновременно с подачей бетонной смеси из АБС в воронку АБН производят его запуск;
- цементный раствор прокачивается впереди бетонной смеси между двумя пыжами.

Для увеличения пластичности бетонной смеси, доставленной первым АБС, добавляют около 10 % цемента сверх предусмотренного расчетом.

Не рекомендуется добавлять воду в бетонную смесь. При добавлении 10 л воды на 1 м^3 смеси прочность бетона снижается на 7 - 8 %.

О любых отклонениях в качественных характеристиках бетонных смесей от заданных немедленно сообщают на бетонный завод.

В приемном бункере обычно устанавливают откидную решетку, чтобы исключить попадание в насос инородных предметов и крупных частиц заполнителя (размером более допустимого).

При перекачке приемная воронка АБН заполняется бетонной смесью, это предотвращает попадание воздуха в рабочую камеру насоса.

В течение смены обеспечивается непрерывная перекачка бетонной смеси. Перерывы в работе АБН (случайные или организационные, например демонтаж звена трубопровода) не рекомендуется превышать более чем на 15 - 20 мин. При более продолжительных перерывах, приближающихся к срокам схватывания бетона (определяются строительной лабораторией), бетонную смесь прокачивают по замкнутому контуру системы бетононасос - бетоновод на стреле. При этом гибкий шланг на конце бетоновода крепится к приемному бункеру АБН. В случае прокачивания бетонной смеси по системе бетононасос - бетоновод на стреле - бетоновод из стальных труб насос и бетоновод после перекачки освобождается от бетонной смеси и промывается вся система.

Бетонная смесь по бетоноводу подается непосредственно к месту укладки. Высота свободного падения бетонной смеси регламентируется указанной в СНиП 3.03.01-87 «Несущие и ограждающие конструкции».

Бесперебойная работа АБН предотвращает причины, вызывающие образование пробок в бетоноводе. Пробки образуются, если:

- неправильно подобран состав бетонной смеси;
- применена расслоившаяся бетонная смесь;
- увеличено сопротивление движению смеси по бетоноводу сверх расчетного за счет вмятин на трубопроводе или остатков бетона в нем из-за плохой промывки или утечки цементного раствора в местах стыковки труб бетоновода;
- появляется вода в изгибах или на низких участках бетоновода;
- бетоновод нагревается в жаркую погоду.

Образование пробок в бетоноводе нарушает процесс бетонирования конструкций, поэтому персонал, обслуживающий комплект машин, должен уметь быстро обнаружить и ликвидировать их. Основным приемом удаления пробок – переключение бетононасоса на обратный ход. Образование пробок характеризуется следующими признаками:

- золотниковая камера подвижной трубы неточно устанавливает последовательные контакты - этот признак указывает на возникновение пробки в кожухе золотниковой камеры бетонораспределителя. Если пробку из рабочего цилиндра не удастся удалить путем обратного хода, то кожух золотниковой камеры откидывается и пробка удаляется (при обесточенном насосе и выключенном двигателе);

- внезапная остановка бетононасоса - это признак возникновения пробки в начале бетоновода. Бетононасос немедленно отключается от сети, снимается первое звено бетоновода, удаляется уплотнившаяся смесь, а звено промывается;

- постепенное повышение давления в бетоноводе с одновременным снижением производительности насоса до нуля свидетельствует о возникновении пробки в конце бетоновода. Пробку удаляют, отсоединив и очистив концевые звенья бетоновода;

- течь цементного молока в местах соединения звеньев бетоновода указывает на вероятность образования пробки в следующем от стыка звене по направлению движения бетонной смеси;

- подрагивание трубопровода до места образования пробки;

- пробки часто возникают на участке, расположенном сразу же за резким поворотом бетоновода;

- пробку можно обнаружить на звук при легком постукивании трубопровода деревянным молотком.

Звенья бетоновода после ликвидации пробки очищают от бетонной смеси и промывают.

При работе АБН со стрелой используют пульт дистанционного управления. Это позволяет машинисту находиться непосредственно у места укладки бетонной смеси и точно регулировать положение стрелы и работу АБН. Концевой шланг с помощью специальной ручки или веревки, укрепленной на нем, направляют на место укладки бетонной смеси.

Бетонирование конструкций при прокладке дополнительного бетоновода из инвентарных труб осуществляют методом «на себя» от наиболее удаленной точки, постепенно демонтируя звенья бетоновода. После завершения бетонирования производится очистка бетоновода от оставшейся бетонной смеси. Очистка может быть произведена водой под давлением.

Объем промывочной воды определяется из расчета 8 л на 1 м бетоновода диаметром 100 мм, 13 л - на 1 м бетоновода диаметром 125 мм и 18 л - на 1 м бетоновода диаметром 150 мм. Кроме того, необходимы 200 - 300 л воды для промывки приемной воронки и других частей АБН.

По окончании бетонирования стрела АБН отводится от бетонируемой конструкции, тщательно промываются бетононасос и бетоноводы.

Очистка бетононасоса производится в следующей последовательности:

- снимается давление в системе кратковременной работы АБН на «обратный ход» и производится остановка насоса;

- удаляется бетонная смесь из нагнетательного патрубка;
- закладывается в нагнетательный патрубок один – два пыжа, полностью пропитанные водой;
- пыжи под давлением воды с максимальной скоростью прогоняются по бетоноводу.

После очистки бетононасоса стрела складывается в транспортное положение. Аутригеры убираются только при полностью сложенной стреле, после чего АБН может следовать на новое место работы или в гараж.

Арматура гидравлической системы, узлы переключающих устройств, детали АБН, подвергающиеся абразивному износу, разбираются, чистятся, проверяются на степень износа и смазываются или заменяются через определенное количество отработанных часов, обозначенных в паспорте и инструкции по эксплуатации АБН.

Бетонные смеси укладывают в конструкцию с помощью АБН согласно проекту производства работ. Комплект машин по укладке бетонной смеси состоит из АБН для подачи и распределения бетонной смеси и необходимого по расчету количества АБС для транспортировки готовой бетонной смеси.

При необходимости перекачивания бетонной смеси на расстояния, превышающие дальность или высоту подачи одним АБН, комплект машин может включать два АБН, устанавливаемых последовательно. При этом соблюдаются следующие требования:

- первый АБН устанавливается для подачи бетонной смеси в приемный бункер второго автобетононасоса;
- состав бетонной смеси принимается в соответствии с требованиями, предъявляемыми для перекачки бетонной смеси АБН;
- АБН работают с равной производительностью.

Для оценки высоты и дальности подачи бетонной смеси, а также для определения интервала стоянок АБН используют соответствующие графики, в которых предусмотрен комплект инвентарных труб (20 шт.). Для определения интервала стоянок АБН на графике откладывают контурные точки разреза здания или сооружения.

Бетонную смесь доставляют в количестве, обеспечивающем укладку 40 - 250 м³ в смену. При этом общий объем смеси, укладываемой в конструкцию, рекомендуется не менее 100 м³ (для двухсменной работы комплекта).

Выбор режима работы АБН зависит:

- от вида бетонируемой конструкции;

- протяженности бетоноводов;
- способов загрузки бункеров АБН бетонной смесью;
- организации производства работ по укладке бетонной смеси в конструкции и т.д.

Эксплуатационная среднесменная производительность бетононасосных установок с учетом давления в бетоноводе, а также факторов, указанных выше, может быть выражена следующей формулой:

$$P_3 = P_T K_1 K_2 \dots K_6, \text{ м}^3 / \text{смену},$$

где P_T - производительность АБН, указанная в паспорте (техническая);
 K_1 - коэффициент, учитывающий снижение производительности АБН в зависимости от вида бетонируемой конструкции.

В малоармированных массивных конструкциях (отдельно стоящие фундаменты, фундаментные плиты значительной толщины и т.д.) подача и распределение бетонной смеси осуществляются при максимально возможной производительности бетононасоса. В густоармированных и особенно тонкостенных конструкциях, где требуется более тщательное уплотнение и обработка поверхности забетонированной конструкции, распределение бетонной смеси осуществляется при минимальной производительности АБН.

Ориентировочные значения величин коэффициента K_1 приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Ориентировочные значения величины коэффициента K_1

| Вид конструкции | Значение коэффициента K_1 |
|--|-----------------------------|
| Отдельно стоящие фундаменты объемом: | |
| до 4 м ³ | 0,7 |
| до 6 м ³ | 0,8 |
| до 10 м ³ | 0,9 |
| более 10 м ³ | 0,95 |
| Стены толщиной: | |
| до 0,2 м | 0,75 (0,3) |
| до 0,5 м | 0,85 (0,4) |
| до 1,0 м | 0,95 (0,6) |
| Горизонтально-плоскостные элементы (фундаментные плиты, плиты перекрытий и т.п.) с приведенной толщиной: | |
| до 0,2 м | 0,85 (0,5) |
| до 0,5 м | 0,90 (0,6) |
| до 1,0 м | 0,95 (0,75) |
| до 1,5 м | 1,0 (1,0) |

Примечание. В скобках приведены значения коэффициента для случая применения стационарного бетоновода.

K_2 - коэффициент, учитывающий снижение производительности бетононасоса в зависимости от длины прямолинейного горизонтального участка бетоновода при соответствующей величине давления в нем, возникающего при перекачивании бетонной смеси. Ориентировочно этот коэффициент определяется по графикам (рис. 2.5).

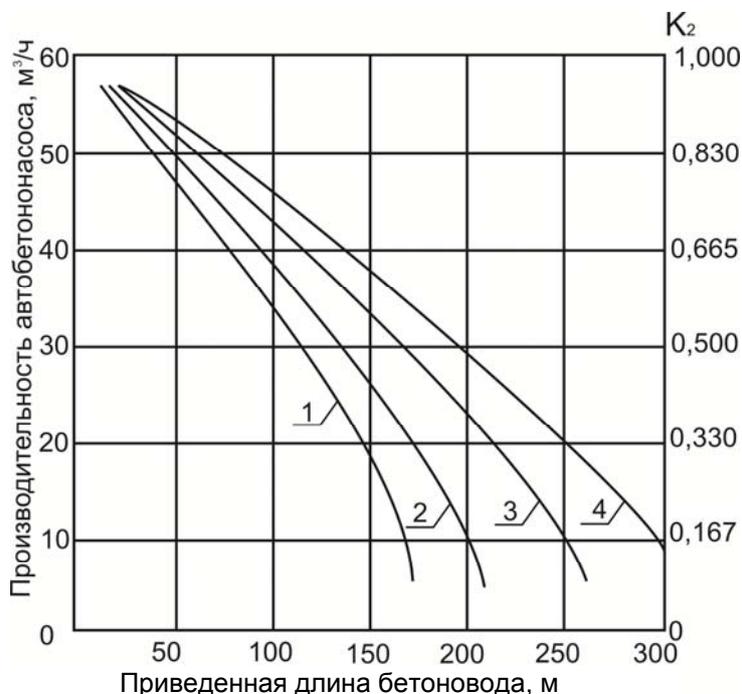


Рис. 2.5. Изменение производительности АБН СБ-170-1 (170-1А) в зависимости от длины бетоновода: диаметр бетоновода 125 мм, подвижность бетонной смеси 1 - 4, 2 - 8, 3 - 12, 4 - 14 см

$K_3 = 0,93$ - коэффициент, учитывающий потери времени на ежесменный уход за бетононасосом и его техническое обслуживание.

$K_4 = 0,90$ - коэффициент, учитывающий квалификацию машиниста (оператора) АБН;

K_5 - коэффициент, учитывающий снижение производительности АБН из-за различных организационно-технологических причин, определяется по формуле

$$K_5 = \frac{t}{t + \sum t_i},$$

где t - продолжительность бетонирования конструкций при фактической производительности бетононасоса с учетом коэффициентов K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 , ч; $\sum t_i$ - суммарная продолжительность перерывов в работе бетононасосной установки, связанных с перебазированием установки с одной стоянки

на другую, с объекта на объект, монтажом и демонтажем бетоновода, ремонтом опалубки и арматуры и другими причинами, ч.

K_6 - продолжительность смены, ч.

Каждой длине бетоновода, указанной на графиках, соответствует вполне определенная величина давления в нем, необходимая для преодоления гидравлических сопротивлений перекачиваемых бетонных смесей. Если принять величину гидравлического сопротивления, возникающего при прохождении бетонной смесью 1 м горизонтального бетоновода, за единицу, тогда сопротивление на кривых, вертикальных участках бетоновода, а также бетоновода из резиноканевых шлангов можно определять как эквивалентное прямолинейным горизонтальным участкам бетоновода.

Согласно рекомендациям фирмы «Штеттер» («Schwing») и экспериментальным исследованиям для АБН:

- каждый поворот трассы бетоновода на 10° приравняется к 1 м горизонтального бетоновода;

- 1 м вертикального стояка соответствует 3 м горизонтального бетоновода;

- 1 м резиноканевого распределительного шланга стационарного бетоновода соответствует 6 м горизонтального бетоновода (с учетом поворотов шланга при распределении бетонной смеси);

- 1 м вертикального бетоновода на стреле АБН соответствует в среднем 70 м горизонтального бетоновода.

Расчет необходимого количества АБС приведен на рис. 2.6. Время одного рейса АБС устанавливается хронометражем и расчетом в зависимости от расстояния от объекта до бетонного завода и других факторов.

При назначении состава бригады для работы с комплектом машин руководствуются следующими рекомендациями:

- работу по управлению бетононасосом осуществляет машинист, имеющий разряд не менее 5-го;

- контроль за составом бетонной смеси, загружаемой в бункер АБН, осуществляет один из машинистов.

Для монтажа и демонтажа стационарных бетоноводов из инвентарных труб назначается звено в составе не менее четырех слесарей-монтажников.

Для распределения бетонной смеси в массиве конструкции с помощью стрелы АБН в состав звена включают двух бетонщиков 4 – 5-го разрядов.

При распределении бетонной смеси с использованием стационарного бетоновода из инвентарных труб в тонкостенные конструкции, а также конструкции, требующие дополнительной обработки поверхности, звено состоит из трех – четырех бетонщиков 3 – 5-го разрядов.

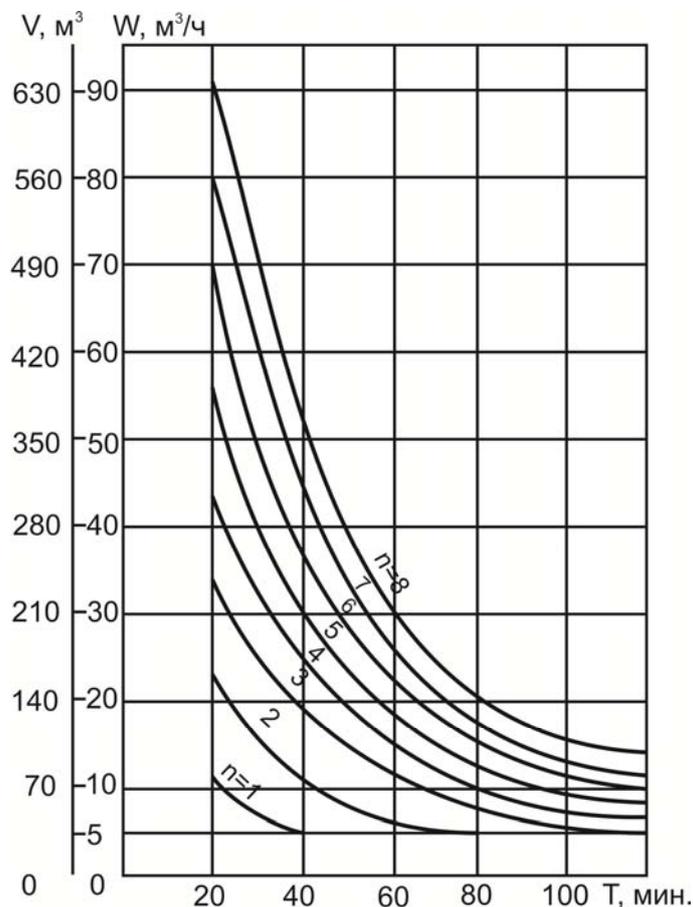


Рис. 2.6. График определения необходимого количества АБС СБ 92-1А емкостью 4,0 м³ при доставке бетонной смеси для АБН: V - объем бетонной смеси, укладываемой в смену, м³; W - интенсивность бетонирования, м³/ч; $T = T1 + T2$ - суммарное время загрузки и пребывания в пути, мин; n - количество АБС, доставляющих бетонную смесь, шт.

При бетонировании густоармированных конструкций сложной конфигурации целесообразно в состав бригады включать плотника (или монтажника) для наблюдения за состоянием опалубки в процессе бетонирования и принятия срочных мер по ее ремонту в случае необходимости.

Подвижность бетонной смеси выбирается с учетом дальности подачи ее по бетоноводам и продолжительности транспортировки от бетонного завода до объекта.

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРИГОТОВЛЕНИИ БЕТОННОЙ СМЕСИ В СМЕСИТЕЛЬНОМ БАРАБАНЕ АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЯ

§ 3.1. Исследование процессов, происходящих при приготовлении бетонной смеси в смесительном барабане

Смесительное оборудование, устанавливаемое на АБС, относится к гравитационным бетоносмесителям с конусным барабаном и со встречной схемой движения материала в процессе загрузки и выгрузки. В таких барабанах напряжение сдвига и скорости сдвига в бетонной смеси создаются в результате радиальных и осевых перемещений ее внутренними стенками барабана и лопастным аппаратом. Степень участия в процессе смешивания каждого из этих элементов определяется не только их параметрами, но и свойствами загруженной смеси.

В случае с малоподвижными смесями (ОК 0 – 3 см) с низким содержанием цемента подъем смеси внутри барабана при его вращении осуществляется за счет высокого коэффициента трения между жесткой бетонной смесью и внутренней поверхностью барабана, движения смеси относительно лопастей в процессе ее подъема почти отсутствует. Осевые и радиальные потоки смеси формируются в основном внутренней поверхностью барабана. В случае с подвижной смесью (ОК 5 – 8 см) благодаря смазывающему действию цементного теста коэффициент трения между стенками барабана и бетонной массой уменьшается. Потоки формируются в основном лопастным аппаратом [129].

В общем виде скорости сдвига, возникающие в элементарных объемах бетонной смеси, рассчитывают по формуле

$$\frac{dV}{dx} = F(k_{\sigma}, k_{\lambda}, k_{\gamma}, \alpha, n, k_t, k_{\tau}, k_c), \quad (3.1)$$

где аргументы: k_{σ} – характеризующий конструкцию собственно барабана; k_{λ} – учитывающий конструкцию лопастного аппарата; k_{γ} – коэффициент загрузки барабана; α – установка угла наклона оси вращения барабана в транспортном положении; n – частота вращения барабана; k_t – коэффициент температуры бетонной смеси; k_{τ} – коэффициент, учитывающий время транспортирования; k_c – коэффициент, учитывающий состав бетонной смеси.

Проанализируем аргументы этой функции, часть из которых определяется технологической характеристикой рабочего органа – смесительного барабана АБС, другая часть – технологическими параметрами бетонной смеси.

Характеристика смесительного барабана зависит от следующих факторов (рис. 3.1). Воздействие силы тяжести определяет скорость перемешивания компонентов смеси в гравитационном бетоносмесителе в радиальном направлении. Соотношение продольных L и поперечных D_1 размеров барабана определяет способность обеспечить распределение смеси в любом сечении барабана по оси вращения. Максимальный диаметр D_2 барабана определяет также высоту подъема частиц смеси и, следовательно, эффективность ударных воздействий. Однако этот диаметр ограничивается оптимальным соотношением продольных и поперечных размеров барабана и размеров переднего конуса. Внутренний диаметр и принятое соотношение продольных и поперечных размеров барабана связаны с углами конических поверхностей β_1 и β_2 . Передний конус выполняет работу по созданию осевого диффузионного процесса. От телесного угла β_1 этого конуса зависит не только интенсивность осевого потока, но также скорость и степень очистки барабана при выгрузке.

Угол β_2 принимается равным примерно 40° , так как при большем значении происходит застаивание бетонной смеси, сдерживается ее свободное движение и увеличивается ее налипание.

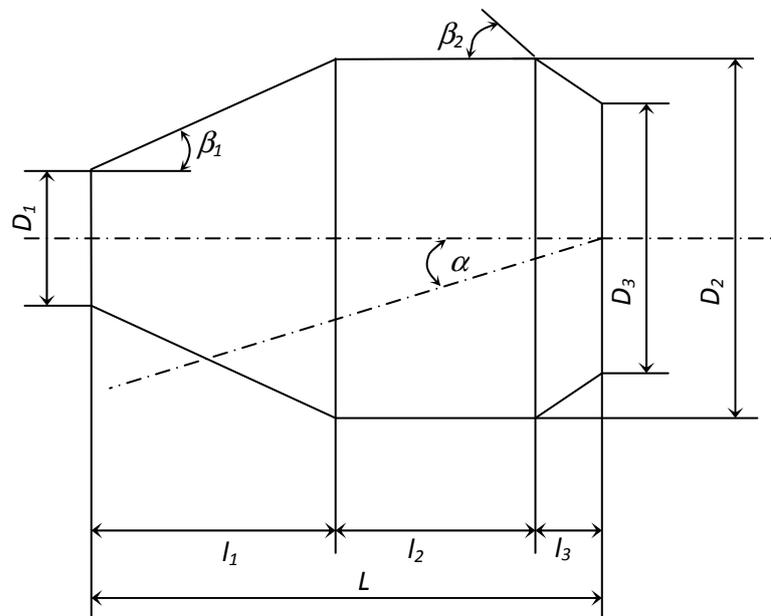


Рис. 3.1. Характеристики параметров смесительного барабана

Лопастной аппарат бетоносмесителя характеризуется типом потокообразования, количеством лопастных пар или элементов, формой лопастей, углами их установки и размерами. В гравитационных смесителях используются три типа потокообразования: переменный, радиальный и перекрестный. В барабанах АБС лопасти выполняются в виде двух винтовых плоских профилей, что создает радиальный и осевой потоки, перекрещивающиеся и сталкивающие компоненты смеси. Винтовые лопасти устанавливаются перпендикулярно к коническим поверхностям барабана.

Коэффициент загрузки бетоносмесителя равен отношению объема сухих компонентов смеси к геометрической емкости смесительного барабана. Естественно стремление увеличить k_3 . Однако превышение допустимого коэффициента связано со снижением эффективности смешивания, т.к. для создания осевых и радиальных потоков необходимо определенное пространство.

Геометрическая емкость барабана определяется исходным параметром – вместимостью бетоносмесителя по загрузке и принятым коэффициентом загрузки. С увеличением диаметра барабана увеличивается вместимость. При этом для исключения центрифугирования частота вращения смесительного барабана АБС n ограничивается в режиме перемешивания 6 – 12 об/мин, а в режиме побуждения 2 – 6 об/мин. За один оборот барабана элементарная частица смеси подвергается однократному воздействию всех составляющих элементов процесса смешивания. Интенсивность воздействия увеличивается за счет увеличения высоты падения компонентов смеси при увеличении диаметра барабана.

Критическая скорость $V_{кр}$ зависит от радиуса барабана и определяется выражением

$$V_{кр} \leq \sqrt{gR}, \quad (3.2)$$

где R - радиус барабана смесителя, м; g - ускорение свободного падения, м/с²;

Для смесителя, радиус барабана которого $R=1$ м, критическая скорость составит $V_{кр} = \sqrt{9,8 \cdot 1} \approx 3,15$ м/с² при скорости вращения барабана порядка 30 об/мин. Частота вращения барабанов серийных АБС обычно не превышает 20 об/мин. Достаточно интенсивное смесеобразование, обеспечивающее получение высококачественной смеси, составляет 6 – 12 об/мин.

Угол наклона оси вращения смесительного барабана обуславливает обратный поток. У АБС он не превышает $\alpha \leq 15^\circ$.

Конструктивные особенности смесительного барабана АБС в значительной степени определяют технологический регламент при транспортировании готовой бетонной смеси k_r или ее приготовлении.

Транспортирование готовой бетонной смеси достаточно жестко регламентируется целым рядом нормативных документов. Однако, как правило, на практике эти указания не соблюдаются. Особенно это относится к смешиванию, которое определяется конкретным суммарным количеством оборотов смесительного барабана АБС для того или иного состава бетонной смеси k_c .

Реализация истинного предназначения АБС для приготовления высококачественной бетонной смеси возможна в нескольких вариантах. По целому ряду критериев наиболее предпочтителен разогрев компонентов бетонной смеси в смесительном барабане АБС паром. При этом используется значительный комплекс дополнительных преимуществ: увеличивается возможность варьирования составом бетонной смеси k_c ; неограниченным становится время транспортирования k_r ; температура бетонной смеси k_t непосредственно на объекте может быть максимально высокой.

Измерение и контроль подвижности бетонной смеси в процессе ее приготовления и/или транспортирования к месту укладки – важная технологическая задача. Актуальность этой задачи применительно к перевозке бетонной смеси в АБС становится тем более значимой потому, что, во-первых, продолжительность транспортирования здесь соизмерима со сроками начала схватывания цемента, и, во-вторых, в рамках рассматриваемого в работе метода разогрева, консистенция бетонной смеси изменяется не только с течением времени, но и вследствие изменения водосодержания, температуры и водопотребности. Необходимость оперативной оценки подвижности бетонной смеси может возникнуть в различных условиях конкретных технологических ситуаций, например, для оценки возможности перекачивания смеси АБН, ее укладки в конструкцию с той или иной плотностью армирования или использования соответствующих средств уплотнения и т.п.

Многими исследователями предпринимались попытки создания методов и приборов, позволяющих получать оперативную информацию о подвижности бетонной смеси непосредственно в бетоносмесителе, основанные на измерении сопротивления сдвигу бетонной смеси по бетонной смеси; мощности, расходуемой на вращение барабана смесителя; крутящего

момента на промежуточном валу смесителя; скорости вращения двигателя и соотношения измеряемых величин с величиной подвижности благодаря устанавливаемой ранее корреляции между ними [130, 131, 132, 133, 134].

Основные недостатки перечисленных выше методов – связь измеряемых параметров с износом лопастей и шестерен, состоянием редуктора, обрастанием датчиков бетонной смесью, локальным характером информации и т.п., в результате чего показания становятся неадекватными истинной величине подвижности.

Оптимальным представляется такой способ определения подвижности, который давал бы информацию о консистенции всего объема замеса в целом без фиксации отдельных показателей локальных объемов.

Исследованиями геометрии рабочей среды в барабанных машинах гравитационного типа [135, 136, 137, 138, 139, 140] установлено, что угол отклонения центра массы от вертикали β зависит от радиуса барабана R , угловой скорости вращения ω , вязкости рабочей среды μ , коэффициента внешнего трения рабочей среды по материалу внутренней поверхности барабана f .

З.Б. Канторович [136] установил угол подъема β материальной точки m по внутренней поверхности барабана радиусом R , вращающегося с угловой скоростью ω :

$$\sin \beta = f \frac{\omega^2 R + \sqrt{g^2(1+f^2) - f^2 \omega^4 R^2}}{g(1+f^2)}, \quad (3.3)$$

где f - коэффициент трения материала точки по материалу внутренней поверхности барабана; g - ускорение свободного падения.

Как следует из формулы (3.3), при заданных и постоянных значениях R и ω положение точки однозначно определяется коэффициентом трения f материала точки по материалу внутренней поверхности барабана.

В остановившемся барабане, т.е. при $\omega = 0$ и $f = \operatorname{tg} \varphi$, где φ - угол внешнего трения, которым наделена точка, положение ее определяется следующим образом:

$$\sin \beta = \frac{f}{\sqrt{1+f^2}} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2 \varphi}} = \operatorname{tg} \varphi \cos \varphi = \sin \varphi, \quad (3.4)$$

т.е. в остановившемся барабане точка оказывается отклоненной от вертикали на угол, равный углу внешнего трения пары материалов:

$$\beta = \varphi \quad (3.5)$$

М.П. Макевнин [138] определил положение центра массы рабочей среды, на поверхность которой опирается центральный угол 2α в барабане

радиусом R , вращающемся со скоростью n при коэффициенте внешнего трения f :

$$\sin \beta = \frac{fbRn^2p + \sqrt{b^2(fRn^2p)^2 - (f^2m^2 + b^2)[(fRn^2p)^2 - (f^2m^2)]}}{f^2m^2 + b^2}, \quad (3.6)$$

где $b = \frac{2}{3} \sin^3 \alpha$; $m = \frac{1}{2} \left(2 \sin \alpha - \cos^2 \alpha \ln \frac{1 + \sin \alpha}{1 - \sin \alpha} \right)$;

$$p = \frac{1}{3g30^2} \left[2\alpha - \left(\sin \alpha \cos \alpha + \frac{1}{2} \cos^3 \alpha \ln \frac{1 + \sin \alpha}{1 - \sin \alpha} \right) \right].$$

Из (3.6) следует, что угол подъема центра масс β незначительно зависит от коэффициента заполнения барабана k_3 и его радиуса R ; скорость вращения барабана оказывает на β несколько большее влияние; наиболее существенное влияние на угол подъема центра массы β , независимо от радиуса барабана смесителя, коэффициента его заполнения и скорости вращения оказывает коэффициент внешнего трения. С увеличением коэффициента внешнего трения с $f = 0,3$ до $f = 0,7$ угол подъема центра массы возрастает (при $n = 15$ об/мин и $R = 1,0$ м) с $21,4^\circ$ до $42,7^\circ$, т.е. почти на 100%.

При остановке барабана смесителя, т.е. при $n = 0$, фиксированный угол подъема центра массы определяется коэффициентом заполнения барабана k_3 , т.е. величиной центрального угла 2α , опирающегося на свободную поверхность бетонной смеси, и коэффициентом внешнего трения f .

При $2\alpha = 180^\circ$ и $n = 0$ ($b = 0,67$; $p = 1,2 \cdot 10^{-4}$; $m = 1$) угол β определяется выражением

$$\sin \beta = f(\sqrt{0,44 + f^2})^{-1}. \quad (3.7)$$

Сопоставление (3.4) и (3.7) показывает, что, так как всегда

$$f(\sqrt{0,44 + f^2})^{-1} > f(\sqrt{1 + f^2})^{-1},$$

то угол подъема центра массы всегда больше угла подъема материальной точки, что связано, очевидно, с “поддерживающим” влиянием той части массы рабочей среды, которая расположена, во-первых, ниже центра тяжести, и, во-вторых, различием в величине коэффициента трения покоя и коэффициента трения движения [137]. Фиксированный угол подъема центра массы при внезапной остановке движущегося барабана не зависит от радиуса барабана, а однозначно определяется лишь коэффициентом внешнего трения f .

Соотношения (3.4) - (3.6) определяют зависимость угла подъема центра массы в движущемся (или остановленном) барабане смесителя от коэффициента трения f материала рабочей среды о материал внутренней поверхности барабана, угла внешнего трения или угла естественного откоса φ [139, 140], т.е. от структурных характеристик смеси.

Е.Н. Ходоров [140] прямо указывает на то, что именно под углом естественного откоса располагается поверхность рабочей среды во вращающемся барабане при его остановке.

В свою очередь, З.Б. Канторович и М.П. Макевнин [136, 138] основной статьей расхода электроэнергии во вращающемся барабане, частично заполненном перемешиваемой смесью, считают расход именно на непрерывный подъем сыпучей массы.

Таким образом, вышеизложенное позволяет констатировать, что угол подъема центра массы, равный углу наклона свободной поверхности смеси, определяется такими структурными характеристиками смеси, как вязкость, консистенция, коэффициенты внутреннего и внешнего трения, статический угол естественного откоса.

Анализ рассмотренных соотношений структурных и фрикционных свойств бетонной смеси позволяет квалифицировать зависимость этих свойств от водосодержания (водоцементного отношения, подвижности) смеси как физическую закономерность, проявляющуюся в увеличении структурной вязкости смеси с ростом В/Ц от 0 до 0,3 - 0,4 и последующем ее снижении с продолжающимся ростом В/Ц $> 0,4$.

Таким образом, как это уже отмечалось, максимальный угол наклона свободной поверхности смеси, максимальный угол подъема центра массы и максимальный коэффициент внешнего трения наблюдаются при водосодержании, соответствующем В/Ц $\approx 0,4$, что, в свою очередь, согласуется с представлениями И.Н. Ахвердова [89, 141] о наличии резко выраженного пика как в величине предельного напряжения сдвига в функции от В/Ц, так и в величине коэффициента внутреннего трения в функции от коэффициента нормальной густоты цементного теста.

§ 3.2. Исследование однородности пароразогретой бетонной смеси, приготавливаемой в смесительном барабане

Требования к материалам, используемым для приготовления пароразогретых бетонных смесей, изложены в Руководстве применительно к производству сборного железобетона [142].

При повышении температуры, а также в зависимости от скорости загустевания и степени водопотребности бетонной смеси все цементы, применяемые для изготовления изделий из пароразогретых смесей, по своей эффективности делятся на три группы:

I – малозагустевающие: портландцементы на низкоалюминатных клинкерах (C_3A до 5 %); портландцементы с минеральными добавками на низкоалюминатных клинкерах, добавками, не повышающими водопотребности цемента, или активными минеральными добавками осадочного происхождения в количестве не более 5%; пластифицированные портландцементы; шлакопортландцементы;

II – среднезагустевающие: портландцементы на среднеалюминатных клинкерах (C_3A 5 – 9 %); портландцементы с минеральными добавками на среднеалюминатных клинкерах;

III – сильнозагустевающие: портландцементы и портландцементы с минеральными добавками на высокоалюминатных клинкерах (C_3A более 9 %).

Целесообразность применения быстротвердеющих цементов для пароразогретых смесей, относящихся к цементам II и III групп, рекомендуется определять на основе опытной проверки роста их водопотребности. Цементы с ростом водопотребности более 4 % на каждые 10 °С повышения температуры применять не рекомендуется. Применение пуццолановых портландцементов, обладающих повышенной водопотребностью, которая интенсивно растет при повышении температуры бетонной смеси при пароразогреве, не рекомендуется. Применение глиноземистого цемента при пароразогреве бетонной смеси не допускается.

В Руководстве [142] отмечается, что крупный и мелкий заполнители, применяемые для приготовления пароразогретых тяжелых бетонных смесей, должны удовлетворять требованиям ГОСТ 10268-70, а в качестве воды затворения бетонной смеси рекомендуется использовать обычную водопроводную воду, удовлетворяющую требованиям п. 4.11 СНиП III-15-76.

В исследованиях применялись цементы I группы - шлакопортландцементы Ульяновского и Топкинского цементных заводов (C_3A - 4,6 %); цементы II группы - портландцементы тех же производителей (C_3A - 7,9 %); цементы III группы – портландцементы Яшкинского цементного завода (C_3A - 13 %). Количественное содержание основных минералов клинкера и физико-механические свойства цементов, представленные в паспортах, отражено в табл. 3.1.

Таблица 3.1

*Минералогический состав клинкера
и физико-механические свойства цементов*

| Цемент | Минералогический состав, % | | | | Сроки схватывания, ч-мин | | Удельная поверхность, см ² /г | Активность цемента в 28 суток, МПа |
|----------------|----------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------------|--------|--|------------------------------------|
| | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF | Начало | Конец | | |
| Яшкинский ПЦ | 48 | 25 | 13 | 10 | 2 - 50 | 6 - 00 | 3097 | 50,8 |
| Топкинский ПЦ | 53 | 21,3 | 7,9 | 15,3 | 1 - 20 | 4 - 00 | 3004 | 42,8 |
| Топкинский ШПЦ | 51 | 28,4 | 4,6 | 13,2 | 3 - 30 | 5 - 30 | 2806 | 32,0 |

В экспериментах по исследованию однородности пароразогретой бетонной смеси, приготавливаемой в смесительном барабане АБС, использовалась бетонная смесь состава: портландцемент М 400 Ульяновского цементного завода, песок Улыбышевского карьера с Мкр 1,2 – 1,35 объемной массой сухого песка 1450 – 1500 кг/м³, щебень гранитный фракций 5 – 20 мм в соотношении 1 : 2,13 : 3,67 из расчета получения бетона марки В 15.

Для проведения экспериментов была разработана и выполнена опытная конструкция бетоносмесителя, позволившая провести исследования процессов, сопровождающих пароразогрев бетонной смеси, аналогично условиям приготовления бетонной смеси в смесительном барабане АБС (рис. 3.2).

За основу был принят гравитационный бетоносмеситель марки СБ-116А с геометрическим объемом барабана 0,1 м³, который был переоборудован под пароразогрев. Так, двигатель, предусматривающий смешивание компонентов бетонной смеси при скорости вращения смесительного барабана 27 об/мин, был заменен двумя электродвигателями, вращающими барабан со скоростью 9 об/мин, т.е. равной скорости вращения смесительного барабана АБС в режиме перемешивания, и 4 об/мин – в режиме побуждения. За счет этого удалось при соответствующем объеме загрузки приблизиться ко времени смешивания компонентов бетонной смеси, составляющему 10 - 20 мин. Три смесительные лопасти, выполненные в виде лопаток, были заменены на две винтовые лопасти из листовой стали (рис. 3.2, а).



а)



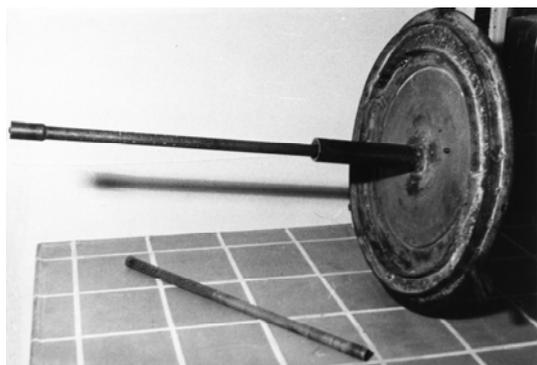
б)



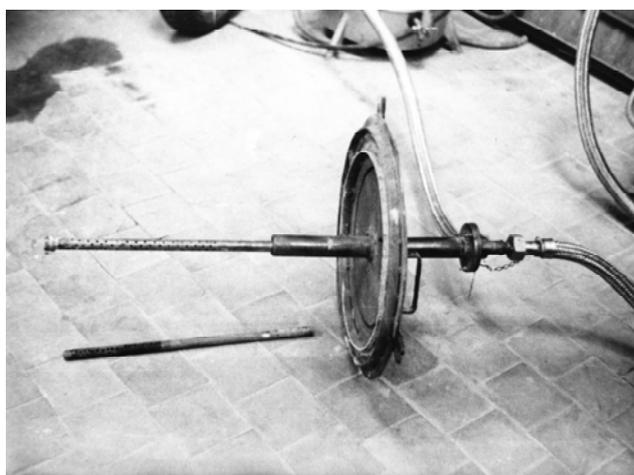
в)



г)



д)



е)

Рис. 3.2. Экспериментальная лабораторная установка: а – бетономеситель марки СБ-116А, переоборудованный двумя винтовыми лопастями; б, в – виды крышки, закрывающей загрузочно-разгрузочное отверстие бетономесителя; г, д – виды труб для подачи пара внутрь бетономесителя; е – крышка с соединительными шлангами

Для исключения неорганизованного выхода неконденсирующейся части пара загрузочно-разгрузочное отверстие бетоносмесителя было закрыто крышкой, оборудованной резиновыми прокладками и проушинами для соединения накидными затворами крышки с барабаном, обеспечивающими плотное прилегание ее к барабану (рис. 3.2, б, в).

Для поддержания внутри смесительного барабана необходимого давления и отвода неконденсирующегося пара на крышке было выполнено круглое отверстие, закрываемое ввинчиванием болта (рис. 3.2, б). Для фиксации положения паропровода внутри смесительного барабана во втулке, вваренной в днище барабана, был выполнен паз (рис. 3.2, а).

Анализ существующих схем введения пара в барабан бетоносмесителя показал, что все варианты предусматривают подачу пара внутрь смеси или во внутреннее пространство бетоносмесителя.

Для проведения исследований были выполнены две трубы, одна из которых проходила по оси смесительного барабана и опиралась своими концами в паз втулки в днище барабана и в отверстие в крышке (рис. 3.2, д), а другая имела один конец свободно расположенный внутри барабана на расстоянии около 20 см от крышки (рис. 3.2, з). В обеих трубах была выполнена перфорация отверстий: в первой трубе – на половине, находящейся в смеси; во второй – на половине, находящейся внутри барабана.

В качестве источника пара использовались два паровых стерилизатора марки ВК-30, воду в которых нагревали трубчатые электрические нагреватели. Давление пара в водопаровой камере регулировалось при помощи электроконтактного манометра, который включал или выключал электромагнитный пускатель.

Соединение паробразователей с бетоносмесителем осуществлялось с помощью термостойких изолированных шлангов (рис. 3.2, е) с вмонтированным переходным устройством, включающим вентиль, манометр и термометр (рис. 3.3).

Контрольно-измерительная и регистрирующая аппаратура включала в себя двенадцатиканальное устройство контроля за температурой смеси марки КСМ-4, соединенное с термопарами ТСМ, вмонтированными в смесительный барабан бетоносмесителя, и устройство контроля мощности двигателя бетоносмесителя, состоящее из амперметра, ваттметра и счетчика потребляемой мощности (см. рис. 3.3).

Идентичность получаемых данных проверялась в сравнении с приготовлением в АБС. Расхождение не превышало $\pm 3,6\%$.

С учетом погрешности дозирования компонентов бетонной смеси в реальных условиях лабораторные исследования можно считать корректными.

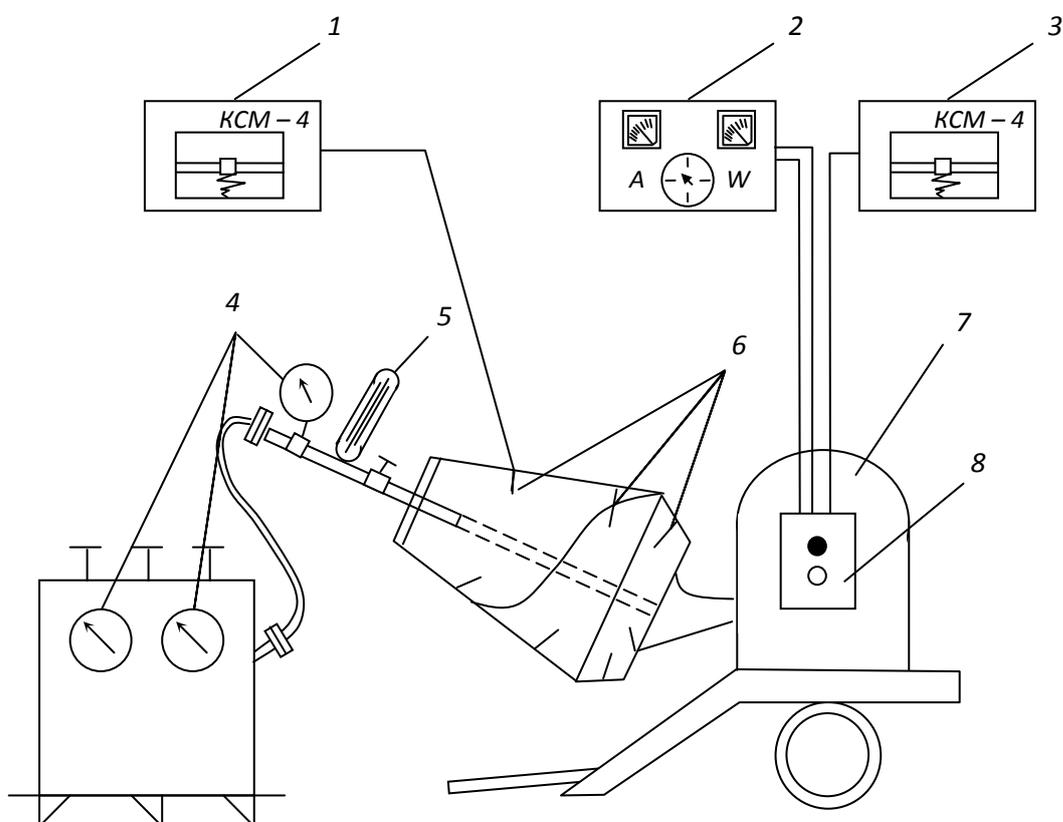


Рис. 3.3. Схема экспериментальной установки: 1 – устройство контроля температуры; 2 – щит приборов (амперметр, ваттметр, таймер); 3 – устройство контроля мощности двигателя; 4 – манометры; 5 – термометр; 6 – термопары; 7 – электродвигатели; 8 – пускатель

При разработке методики проведения исследований были проанализированы методики, применяемые для изучения процессов смешивания компонентов бетонной смеси в смесителях.

В 1933 году С. Уинг, В. Джонс и Р. Кеннеди [143], исследовав процесс перемешивания бетонной смеси, выявили, что максимум средней прочности бетона достигается при продолжительности перемешивания меньшей, чем необходимо для достижения максимально возможной однородности. Позже к такому же выводу пришел А.И. Ваганов [144] и другие исследователи [145, 146].

Таким образом, возникает вопрос: какой показатель следует принять для оценки однородности смеси? Основной критерий качества бетона в

конструкциях – его прочность при сжатии, критерий же качества смешивания – однородность распределения компонентов в смеси.

Однако высокая однородность распределения в смеси компонентов не всегда предопределяет высокую однородность бетона по прочности, которая зависит от характера контактов на границах раздела фаз, распределения воды в микрообъемах цементных зерен и т.п. Определение однородности по анализам свежеприготовленной смеси имеет одно важное преимущество перед определением прочности затвердевшего бетона – это экспрессный характер получаемых результатов [145, 146]. Таким образом, нельзя отказаться ни от одного из двух методов анализа сроков смешивания, рассматривая полученные результаты как дополняющие друг друга.

Простейшие методы анализа однородности свежеприготовленной бетонной смеси – определения рассеивания величин ее подвижности и объемной массы. А.И. Ваганов [144] считает, что для удовлетворительного перемешивания размах колебаний подвижности смеси по трем пробам, отобраным из начала, середины и конца замеса, может составить 1 см при осадке стандартного конуса до 5 см, 2 см при осадке стандартного конуса 6 – 12 см и 3 см при осадке конуса более 13 см.

Стандартом США допускается разность в осадке конуса двух проб бетонной смеси из одного замеса не более 1,9 см или 25 % от среднего значения осадки конуса по двум испытаниям. Аналогичные рекомендации приводятся С. Уокером [147], однако он предлагает принять отклонение величины подвижности 2,54 см.

Проверка однородности бетонной смеси по величине однородности ее объемной массы применялась в 1935 году Пэтчем при строительстве крупной американской плотины Буолдер Дэм. Несмотря на то что было доказано уменьшение колеблемости объемной массы бетонной смеси при увеличении времени смешивания, метод не получил широкого признания, видимо, из-за несоответствия необходимой тщательности определений и практических возможностей строительных лабораторий. Действительно, в [147] считается допустимым отклонение объемной массы в двух пробах из одного замеса не более 24 кг/м³, что менее 1 % и соизмеримо с погрешностью обычных измерений.

В технических условиях различных организаций США встречается метод определения однородности бетонной смеси по разности объемной массы, свободной от вовлеченного воздуха растворной составляющей смеси. Издания [147, 148, 149] рекомендуют ограничить эту разность для двух

проб, отобранных в начале и в конце выгружаемого замеса бетонной смеси, величиной $16 - 32 \text{ кг/м}^3$. В рекомендациях [150, 151] предлагается принять допустимым величину $0,8 \%$ от среднего удельного веса раствора по двум пробам. Плотность раствора тесно связана с величиной водоцементного отношения. Изменение плотности на 16 кг/м^3 при постоянном значении водоцементного отношения в пробах свидетельствует о разности в содержании воды и цемента в смеси соответственно на 7 и $14,2 \text{ кг/м}^3$. Такое же по величине изменение плотности в случае постоянного количества воды в отобранных пробах показывает на изменение содержания цемента в пределах $47 - 53 \text{ кг/м}^3$. Таким образом, исключительно высокая чувствительность метода во избежание грубых ошибок должна сочетаться с большой точностью определения плотности раствора. Этой точности, по свидетельству [147], до последнего времени не удается достигнуть.

Большая группа методов анализа однородности перемешивания основана на прямых определениях однородности содержания в смеси ее составляющих. Наиболее простой из них – метод сравнения однородности распределения в пробах бетонной смеси крупного заполнителя. Техника метода заключается в промывке отобранных и предварительно взвешенных проб бетонной смеси на сите с отверстиями 5 мм и взвешивании остатков. В США [147, 148, 150, 151] допускают разность содержания крупного заполнителя в двух пробах в пределах $5 - 6 \%$ от среднего содержания. Там же отмечается, что превышение допуска по разбросу содержания крупного заполнителя указывает на дефектность конструкции бетоносмесителя, а большая разность в объемных массах растворной составляющей свидетельствует о недостаточном времени перемешивания.

Соглашаясь с этим положением, нельзя в то же время утверждать, что малая вариация объемных масс растворной части проб смеси из замеса говорит о достаточно хорошем перемешивании. Напротив, исследования Р.Х. Киркхэма [148] показали стабилизацию вариации объемной массы растворной части после 30 с перемешивания, тогда как выравнивание в пробах вариации водоцементного отношения было достигнуто лишь после 60 с .

Простой, но не очень точный метод определения содержания в бетонной смеси всех ее компонентов – прокаливание отобранных проб на поддоне при температуре около $150 \text{ }^\circ\text{C}$ с последующим их рассевом на ситах и взвешиванием остатков. При этом методе делается допущение, что высокая температура быстро прекращает процесс гидратации и разность

масс пробы до и после прокаливания соответствует массе воды, содержащейся в бетонной смеси. Применявший этот метод (так называемой «сковородки») В.В. Горохов [152], признавая ошибку метода, предлагает отнести к зернам цемента весь материал, прошедший через сито 0,15 мм.

Значительно более точным является определение содержания компонентов бетонной смеси методами так называемого мокрого анализа. В методе Р.Х. Киркхэма [148] проба бетонной смеси около 4 кг взвешивается в воздухе и воде, затем тщательно промывается на ситах 5 и 0,15 мм для удаления цемента, после чего чистый заполнитель взвешивается в воде. Для расчета составляющих, содержащихся в смеси, по результатам этих измерений нужно также определить удельные веса заполнителей и цемента. В этом методе также следует вводить поправку по массе фракций песка, прошедших сито 0,15 мм, определяемую предварительными опытами. Метод ручного мокрого анализа чрезвычайно трудоемок и продолжителен.

Таким образом, из всех проанализированных методов, единственный, которым можно воспользоваться при исследовании однородности бетонной смеси при приготовлении ее в АБС с пароразогревом, – метод определения однородности бетонной смеси по однородности ее объемной массы. Только при использовании этого метода достигается возможность снятия «пассивной» характеристики бетонной смеси, т.е. такой, которая при возвращении бетонной смеси в исследуемую массу не повлекла бы за собой изменения ее свойств и состояния.

При исследовании моделировались возможные технологические схемы приготовления бетонной смеси в смесительном барабане АБС (см. рис. 1.8 и 3.4).

После дозирования компонентов смеси в соответствующем объеме она загружалась в смесительный барабан последовательно (песок, крупный заполнитель, цемент) или пропорционально (сразу всеми компонентами смеси). При этом барабан вращался в режиме загрузки со скоростью 9 об/мин, а суммарное количество оборотов барабана не превышало 50.

После загрузки барабан вращался в режимах побуждения – 4 об/мин или перемешивания – 9 об/мин. Через каждые 50 оборотов барабан останавливался, и из него бралось две пробы объемом 1 дм³ (1 л) из противоположных частей замеса. Пробы взвешивались на весах с ценой деления 0,5 г и возвращались в смесительный барабан, после чего он вновь вращался и цикл повторялся. Замеры прекращались через 285 – 310 оборотов барабана.

I схема



II схема



III схема

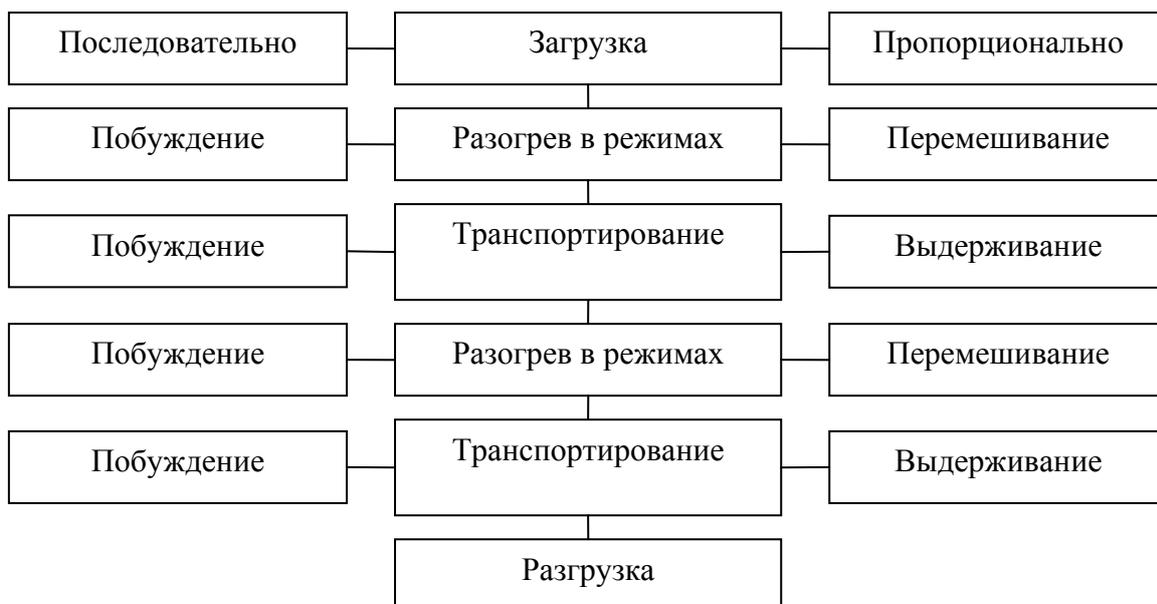


Рис. 3.4. Технологические блок-схемы приготовления бетонной смеси с паропрогревом в автобетоносмесителе

Бетонировать монолитные конструкции при отрицательной температуре пароразогретыми в АБС смесями можно (см. рис. 1.8):

- при строительстве объектов, время доставки бетонной смеси к которым не превышает технологически допустимого для данного вида смеси, – с пароразогревом на бетонном узле (I схема на рис. 3.4);

- строительстве отдаленных (на сколько угодно большое расстояние) объектов, объектов второй и последующих очередей, а также на реконструируемых предприятиях – с получением пара от передвижного парогенератора, существующих стационарной котельной или ближайшего паропровода, (II схема на рис. 3.4);

- с приготовлением пароразогретой бетонной смеси по двухстадийной обработке (III схема на рис. 3.4).

При этом загружать можно последовательно или пропорционально с вращением смесительного барабана в режиме побуждения (4 об/мин) или перемешивания (9 об/мин); разогрев – при стоянке АБС в режимах побуждения или перемешивания; транспортирование – при вращении смесительного барабана в режиме побуждения (чтобы избежать опрокидывания АБС) или без вращения (при выдерживании); разгрузка – при вращении барабана со скоростью 9 об/мин (см. рис. 3.4).

Для выявления влияния пароразогрева на процессы смешивания после загрузки по последовательной или пропорциональной схемам в смесительный барабан бетоносмесителя подавался пар по одному из вариантов – в смесь или на смесь. При загрузке сухой, увлажненной или влажной смесей до достижения заданного водоцементного отношения подавалась вода после подачи пара (П – В) или одновременно с ним (П + В), при этом температура воды равнялась или была выше температуры смеси, которую собирались получить.

Разогрев смоченной смеси производился только паром П. Время разогрева смеси не превышало 15 мин, а температура 72 °С. При проведении экспериментов с разогревом пробы из замеса брались по окончании всего процесса разогрева, т.е. при побуждении через 60 оборотов, а при перемешивании – через 135. После разогрева смесительный барабан бетоносмесителя вращался в режиме побуждения. За последние 50 оборотов производилась выгрузка смеси из смесительного барабана при вращении его со скоростью 9 об/мин.

При исследовании по второй схеме (см. рис. 3.4) после загрузки смесительный барабан вращался в режиме побуждения перед разогревом 50, 100 или 150 оборотов.

При исследовании по третьей схеме (см. рис. 3.4) первый разогрев производился в течение 5 или 10 мин, а второй – 10 или 5 мин. Между разогревом смесительный барабан вращался в режиме побуждения.

При контроле морозостойкости бетона использовались методы, установленные ГОСТ 10060.0-95, а испытания бетона по морозостойкости проводились по методике, определенной ГОСТ 10060.2-95.

Водопоглощение бетона определялось в соответствии с ГОСТ 12730.3-94, а пористость – с ГОСТ 12730.4-94.

При исследовании влияния режимов смешивания на однородность пароразогретой бетонной смеси применялся активный эксперимент с использованием матрицы полного факторного эксперимента с реализацией всех неповторяющихся вариантов [153]. Матрица планирования экспериментов представлена в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Матрица полного факторного эксперимента

| Факторы | Код | Уровни варьирования | | Применение для смесей |
|------------------|-------|---------------------|------------------|---|
| | | нижний | верхний | |
| Загрузка | x_1 | Последовательная | Пропорциональная | $x_1 - x_3$ - неразогретой $x_1 - x_4$ - смоченной $x_1 - x_5$ - сухой, увлажненной, влажной |
| Режим смешивания | x_2 | Побуждение | Перемешивание | |
| Обороты | x_3 | 50 – 200 | 285 – 310 | |
| Подача пара | x_4 | На смесь | В смесь | |
| Подача воды | x_5 | П – В | П + В | |

По результатам исследования были получены зависимости, представленные уравнениями регрессии:

- при смешивании смоченной смеси с пароразогревом (табл. 3.3);

- при смешивании неразогретой (холодной) смеси (табл. 3.4):

$$y_1 = 1,43 - 0,32x_1 + 0,01x_2 - 0,64x_3 - 0,02x_{12} + 0,33x_{13} + 0,13x_{23} - 0,02x_{123},$$

$$y_2 = 1,72 - 0,38x_1 - 0,04x_2 - 0,76x_3 + 0,01x_{12} + 0,34x_{13} + 0,08x_{23} + 0,03x_{123},$$

$$y_3 = 2,04 - 0,51x_1 - 0,1x_2 - 0,95x_3 + 0,05x_{12} + 0,45x_{13} + 0,09x_{23} - 0,01x_{123},$$

$$y_4 = 2,71 - 0,79x_1 - 0,15x_2 - 1,26x_3 + 0,05x_{12} + 0,64x_{13};$$

- сухой смеси с пароразогревом (табл. 3.5).

По результатам исследования был проведен регрессионный анализ моделей.

Таблица 3.3

Числовые значения выходных параметров уравнений регрессии при смешивании смоченной смеси с пароразогревом

| Коэф- фициент | Выходные параметры | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 | y_5 | y_6 | y_7 | y_8 | y_9 | y_{10} |
| – | 2,59 | 2,12 | 1,94 | 1,84 | 2,66 | 2,70 | 2,64 | 2,69 | 2,67 | 2,65 |
| x_1 | -0,78 | -0,47 | -0,41 | -0,38 | -0,84 | -0,84 | -0,83 | -0,82 | -0,82 | -0,81 |
| x_2 | 0,03 | 0,02 | 0,29 | -0,12 | -0,09 | -0,06 | -0,05 | -0,05 | -0,03 | -0,02 |
| x_3 | -1,61 | -1,15 | -1,00 | -0,89 | -0,60 | -1,49 | -1,49 | -1,43 | -1,45 | -1,47 |
| x_4 | -0,03 | -0,02 | -0,02 | -0,03 | -1,48 | -0,04 | -0,06 | -0,01 | -0,03 | -0,03 |
| x_{12} | -0,08 | -0,02 | -0,08 | -0,11 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | -0,00 |
| x_{13} | 0,87 | 0,46 | 0,40 | 0,33 | 0,64 | 0,64 | 0,65 | 0,65 | 0,66 | 0,67 |
| x_{14} | 0,00 | -0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| x_{23} | -0,05 | 0,02 | -0,14 | -0,24 | -0,12 | -0,09 | -0,06 | -0,05 | -0,03 | -0,02 |
| x_{24} | 0,01 | -0,01 | -0,00 | 0,00 | -0,04 | -0,02 | -0,03 | -0,03 | -0,01 | -0,02 |
| x_{34} | -0,03 | -0,02 | -0,02 | -0,03 | -0,02 | -0,04 | -0,06 | -0,01 | -0,03 | -0,03 |
| x_{123} | 0,10 | -0,02 | 0,03 | 0,11 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| x_{124} | 0,01 | 0,00 | -0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| x_{134} | 0,00 | -0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| x_{234} | 0,01 | -0,01 | -0,00 | 0,00 | -0,04 | -0,02 | 0,06 | -0,03 | -0,01 | 0,00 |
| x_{1234} | 0,01 | 0,00 | -0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |

Таблица 3.4

Влияние технологических факторов на однородность неразогретой бетонной смеси

| Количество оборотов | Изменение объемной массы $\Delta\gamma$, % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---|-------|------|-------------|-----|------|---------|------|------|---------------|------|------|-------|------|------|-------------|-----|------|---------|------|-----|-----------|-----|--|
| | Побуждение | | | | | | | | | Перемешивание | | | | | | | | | | | | | | |
| | сухая | | | увлажненная | | | влажная | | | смоченная | | | сухая | | | увлажненная | | | влажная | | | смоченная | | |
| пос.* | пр.** | пр.** | пос. | пр. | пр. | пос. | пр. | пр. | пос. | пр. | пр. | пос. | пр. | пр. | пос. | пр. | пр. | пос. | пр. | пос. | пр. | пос. | пр. | |
| 50 | 2,85 | 1,55 | 1,9 | 3,3 | 4,2 | 2,15 | 5,6 | 2,65 | 2,6 | 1,3 | 3,1 | 3,7 | 1,6 | 1,9 | 3,7 | 1,9 | 5,2 | 2,45 | | | | | | |
| 100 | 2,1 | 1,3 | 1,6 | 2,7 | 3,3 | 1,9 | 4,2 | 2,35 | 1,7 | 1,15 | 2,15 | 2,5 | 1,35 | 1,5 | 2,5 | 1,5 | 3,9 | 1,95 | | | | | | |
| 150 | 1,2 | 0,8 | 1,1 | 2,0 | 2,6 | 1,4 | 3,3 | 1,9 | 1,2 | 0,95 | 1,5 | 1,8 | 1,1 | 1,25 | 1,8 | 1,25 | 2,9 | 1,6 | | | | | | |
| 200 | 0,9 | 0,65 | 0,9 | 1,3 | 1,8 | 1,25 | 2,7 | 1,7 | 1,1 | 0,85 | 1,3 | 1,5 | 1,0 | 1,05 | 1,5 | 1,05 | 1,9 | 1,3 | | | | | | |
| 250 | 0,7 | 0,7 | 0,85 | 1,1 | 1,3 | 1,05 | 2,1 | 1,45 | 0,85 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 0,95 | 1,0 | 1,2 | 1,0 | 1,5 | 1,2 | | | | | | |
| 300 | 0,6 | 0,7 | 0,85 | 1,0 | 1,2 | 1,0 | 1,8 | 1,4 | 0,85 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,05 | 1,1 | 1,05 | 1,4 | 1,2 | | | | | | |

* – последовательная загрузка;

** – пропорциональная загрузка.

Таблица 3.5

*Числовые значения выходных параметров уравнений
при смешивании сухой смеси с пароразогревом*

| Коэф- фициент | Выходные параметры | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 | y_5 | y_6 | y_7 | y_8 | y_9 | y_{10} |
| – | 1,34 | 1,09 | 0,91 | 0,83 | 1,10 | 1,31 | 1,29 | 1,35 | 1,33 | 1,32 |
| x_1 | -0,29 | -0,22 | -0,16 | 0,14 | -0,22 | -0,30 | -0,30 | -0,33 | -0,33 | -0,30 |
| x_2 | -0,02 | -0,00 | 0,19 | 0,26 | -0,00 | -0,03 | 0,01 | -0,03 | -0,00 | -0,00 |
| x_3 | -0,74 | -0,60 | -0,44 | 0,38 | -0,60 | -0,88 | -0,91 | -0,85 | -0,87 | -0,18 |
| x_4 | -0,01 | 0,01 | -0,00 | 0,02 | -0,02 | -0,03 | -0,03 | -0,02 | -0,02 | -0,03 |
| x_5 | 0,35 | 0 | 0,01 | 0,01 | -0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| x_{12} | 0 | 0,02 | -0,04 | 0,07 | 0,02 | 0,01 | -0,00 | -0,02 | 0,03 | -0,00 |
| x_{13} | 0 | 0,18 | 0,13 | 0,10 | 0,19 | 0,35 | 0,35 | 0,32 | 0,32 | 0,32 |
| x_{14} | 0,1 | -0,00 | -0,00 | 0,00 | -0,60 | 0,00 | 0,00 | -0,00 | -0,01 | -0,01 |
| x_{15} | 0,01 | 0 | 0,00 | 0,00 | -0,00 | -0,00 | 0,00 | -0,01 | -0,01 | -0,01 |
| x_{23} | 0,02 | -0,00 | -0,16 | 0,22 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | -0,03 | -0,01 | -0,00 |
| x_{24} | -0,01 | -0,03 | -0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | -0,00 | 0,00 | 0,00 |
| x_{25} | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| x_{34} | -0,01 | -0,01 | -0,02 | 0,02 | -0,01 | -0,03 | -0,03 | 0,02 | -0,02 | 0,03 |
| x_{35} | 0 | 0 | 0,00 | 0,01 | -0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| x_{45} | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | -0,00 | -0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Были построены графики, которые отражают зависимости:

- влияния продолжительности смешивания в бетоносмесителе в разных режимах (побуждения, перемешивания) на однородность объемной массы неразогретых (холодных) компонентов бетонной смеси различной влажности (смесь сухая, увлажненная, влажная и смоченная) при разных схемах загрузки (последовательная, пропорциональная);

- влияния продолжительности смешивания в бетоносмесителе в разных режимах (побуждения, перемешивания) на однородность объемной массы пароразогретой бетонной смеси при подаче пара (в смесь, на смесь)

в сухую, увлажненную, влажную и смоченную смесь в последовательности: для сухой, увлажненной и влажной смесей – сначала пар, затем вода (П – В) или одновременно пар и вода (П + В); для смоченной смеси – пар – (П) при разных схемах загрузки (последовательно, пропорционально) (I схема на рис. 1.8 и рис. 3.4);

- аналогичные представленным для I схемы (см. рис. 1.8, 3.4). Отличительной особенностью является то, что разогрев производится не на бетонном узле (I схема), а после транспортирования (в режиме побуждения) на строительной площадке, что отражает возможные варианты приготовления пароразогретой смеси в АБС по II схеме (по рис. 1.8 и рис. 3.4).

- аналогичные полученным по первым двум схемам (см. рис. 1.8, 3.4). Особенность состоит в том, что разогрев производится как на бетонном узле, так и на строительной площадке, что отражает возможные варианты приготовления пароразогретой бетонной смеси в АБС по III схеме (по рис. 1.8 и рис. 3.4).

§ 3.3. Исследование водопотребности компонентов бетонной смеси при пароразогреве

Группа аргументов формулы (3.1) связана с технологическими характеристиками бетонной смеси, которые в значительной мере зависят от водопотребности пароразогретой смеси. В свою очередь, водопотребность смеси определяется водопотребностью компонентов и уточняется при назначении того или иного состава бетонной смеси. Необходимо отметить, что при подборе состава бетона из пароразогретой смеси при неизменном расходе цемента некоторое повышение В/Ц за счет роста водопотребности пароразогретой смеси не снижает прочности бетона независимо от сроков твердения. Это связано с тем, что повышенное водосодержание пароразогретой смеси частично компенсируется ее меньшим воздухосодержанием, большей степенью гидратации, а также частичным испарением влаги при транспортировании, подаче, укладке и выдерживании пароразогретой бетонной смеси.

На рис. 3.5 и 3.6 отражены результаты экспериментов по изменению водопотребности соответственно песка и щебня в зависимости от изменения температуры среды.

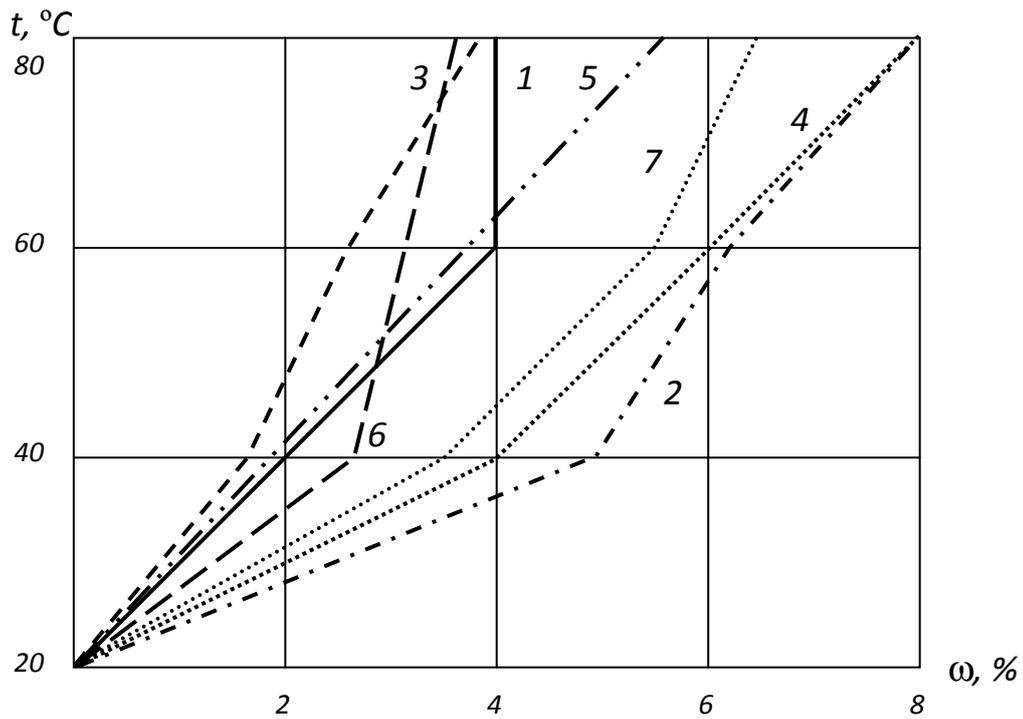


Рис. 3.5. Изменение водопотребности песка из карьеров:
 1 – Мебельная фабрика; 2 – Храпки; 3 – Балакирево; 4 – Пищепром;
 5 – Ельцы; 6 – РСУ; 7 – Институт

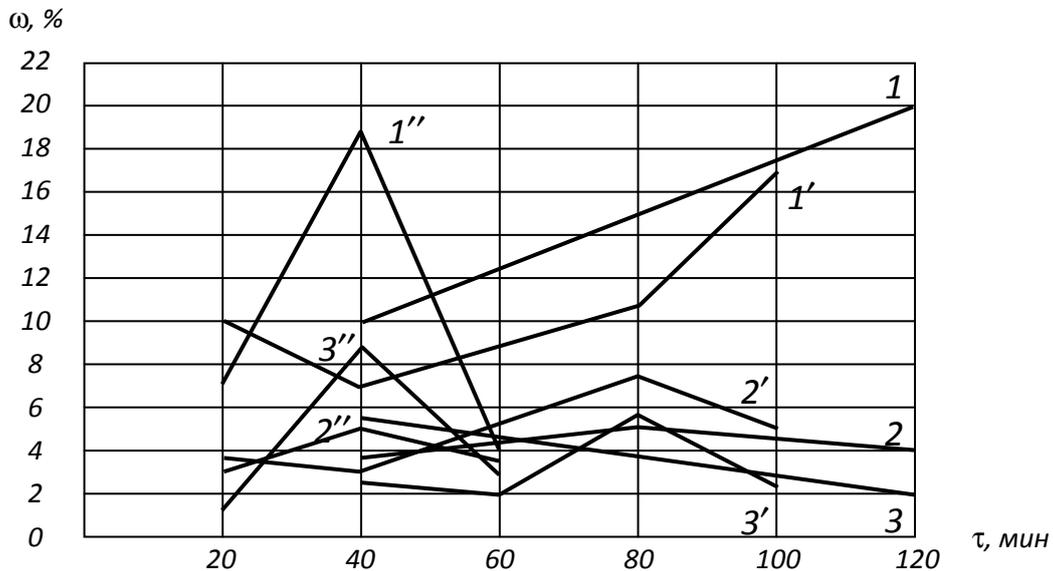


Рис. 3.6. Изменение водопотребности известкового щебня:
 1, 1', 1'' – фракции 5 – 10 мм при температуре соответственно 40, 60, 80 °С;
 2, 2', 2'' – фракции 10 – 20 мм при температуре соответственно 40, 60, 80 °С;
 3, 3', 3'' – фракции 20 – 40 мм при температуре соответственно 40, 60, 80 °С

Определение водопотребности пароразогретой бетонной смеси изложено в Руководстве [142]. В зависимости от группы цемента и режима пароразогрева смеси устанавливается коэффициент водопотребности K_w , который равен отношению В/Ц в растворе, разогретом по конкретному режиму, к В/Ц в неразогретом растворе при условии равенства вибровязкости этих растворов. Значения K_w для разных групп цемента и режимов приготовления пароразогретой смеси приведены на рис. 3.7 – 3.9.

Проведенные исследования и полученные графические зависимости выявили следующие общие закономерности:

1. При пропорциональной загрузке неразогретой (холодной) смесью компонентов из предварительно высушенных заполнителей однородность смеси достигается быстрее, чем при последовательной загрузке смеси компонентов с начальной влажностью.

2. Достаточное смешивание в режиме «перемешивание» происходит за меньшее суммарное число оборотов, чем в режиме «побуждение».

3. С увеличением влажности смеси однородность ее уменьшается.

4. Подача пара в смесь приводит к более быстрому (за меньшее число оборотов барабана) смешиванию, чем подача пара на смесь.

5. Последовательное введение пара и воды ведет к более быстрому смешиванию, чем одновременное введение пара и воды.

6. Наименьшее число оборотов барабана для получения однородной смеси достигается при последовательном введении пара в смесь и воды при вращении барабана в режиме перемешивания.

7. Пароразогрев смеси позволяет добиться лучшей однородности смеси при смешивании за более короткое время.

8. При последовательной загрузке смеси компонентами с повышенной влажностью заполнителей необходимой однородности (изменение объемной массы меньше 1%) можно добиться только при пароразогреве смеси.

9. Смешивание зависит от этапа пароразогрева. Изменение объемной массы минимально при побуждении после 200 оборотов.

10. Минимальное изменение объемной массы получено при пропорциональной загрузке сухой смеси и подаче пара в смесь.

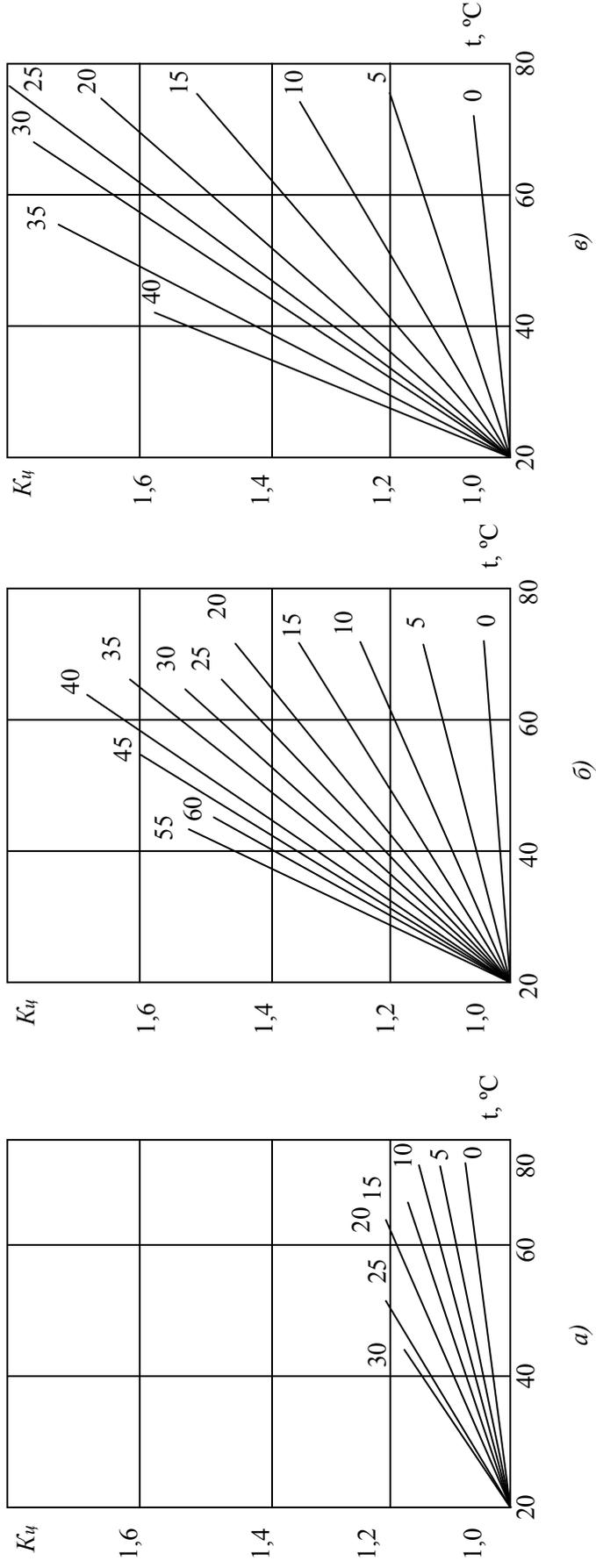


Рис. 3.7. Значения коэффициента водопотребности $K_{ч}$ цементов I группы:

а – без вращения; *б* – с побуждением; *в* – с перемешиванием;

0 – сразу после разогрева; 5, 10, 15, ... 55 – соответственно через

5, 10, 15, ... 55 мин после пароразогрева бетонной смеси



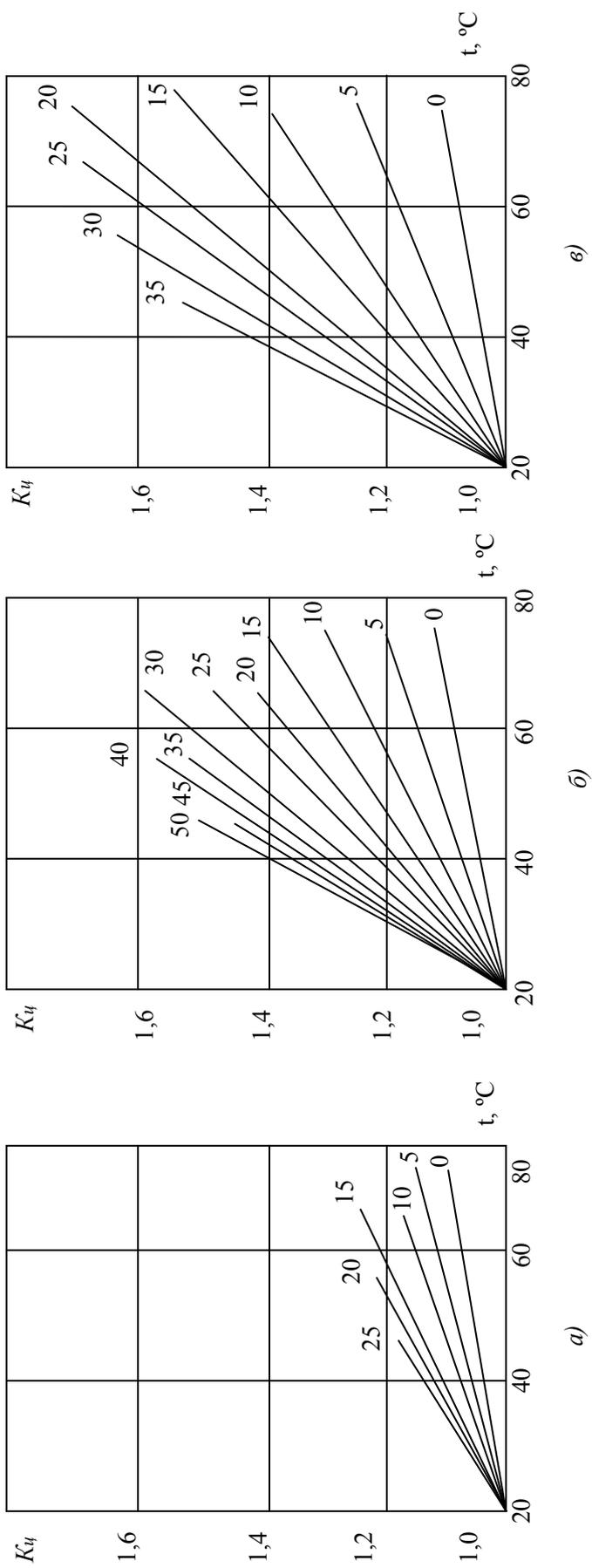


Рис. 3.8. Значения коэффициента водопотребности $K_{ц}$ цементов II группы:
 а – без вращения; б – с побуждением; в – с перемешиванием; 0 – сразу после
 разогрева; 5, 10, 15, ... 50 – соответственно через 5, 10, 15, ... 50 мин
 после пароразогрева бетонной смеси

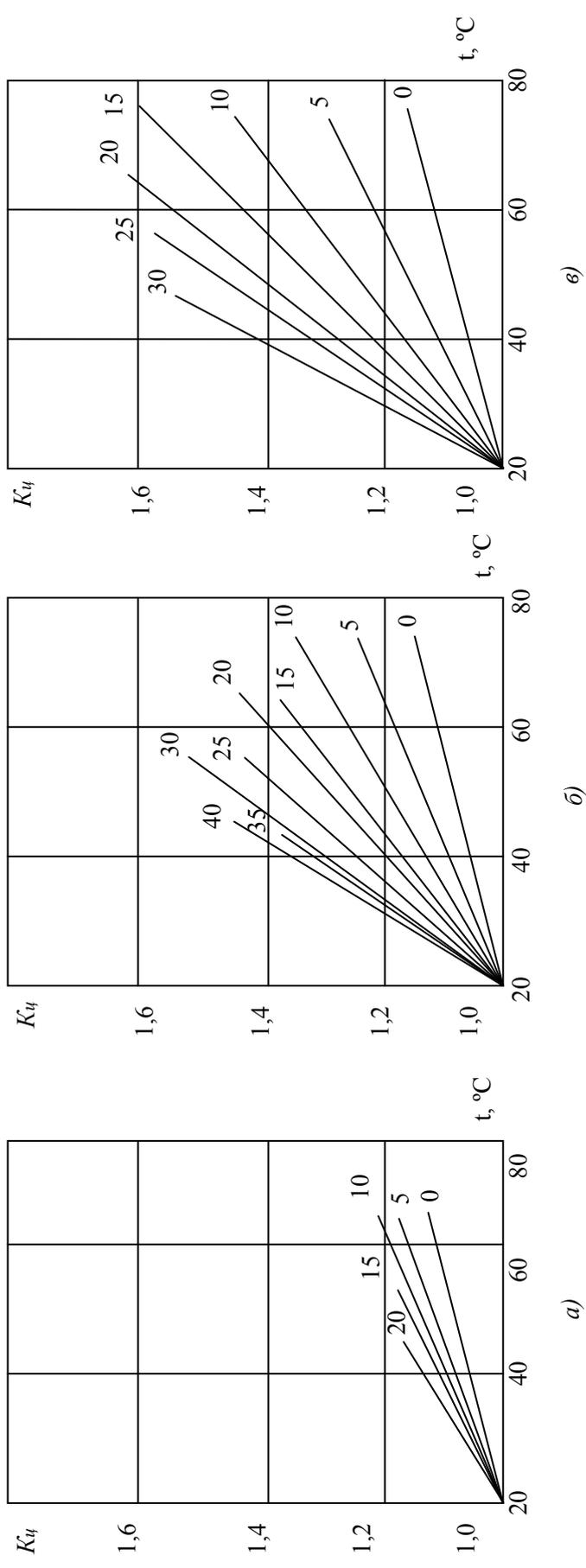


Рис. 3.9. Значения коэффициента водопотребности K_u цементов III группы:
 а – без вращения; б – с побуждением; в – с перемешиванием;
 0 – сразу после разогрева; 5, 10, 15, ... 40 – соответственно через
 5, 10, 15, ... 40 мин после пароразогрева бетонной смеси



Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРОРАЗОГРЕВА БЕТОННОЙ СМЕСИ НА ЕЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА

§ 4.1. Исследование технологических свойств парообразованной в смесительном барабане бетонной смеси

Приготовление парообразованных смесей в смесительном барабане АБС с применением различных технологических приемов приводит к изменению технологических свойств бетонных смесей.

При парообразовании в смесителе компоненты смеси многократно попадают в зону действия струи пара и разогреваются. Выходя из зоны действия струи пара, частицы отдают тепло в окружающую среду и охлаждаются. Такие температурные перепады в сочетании с пониженной вязкостью воды и повышенной проницаемостью пара приводят к разрушению первично образовавшихся флоккулов цементных частиц, их диспергации, эффективный радиус частиц уменьшается с 55 мкм (для холодных) до 37 мкм для разогретых бетонных смесей [32].

В зависимости от принятой технологической схемы приготовления смеси может осуществляться транспортирование либо холодных компонентов, либо разогретой смеси. Время транспортирования смеси в смесительном барабане АБС в теплое время года Руководство [54] рекомендует принимать с учетом режима перевозки и состояния загружаемых материалов (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Рекомендуемое время и режим транспортирования в автобетоносмесителях

| Вид бетонной смеси | Рекомендуемое время нахождения в пути, ч | Режим транспортирования смеси |
|--------------------|--|-------------------------------|
| Сухая | Не ограничено | А |
| Смоченная | Не более 3 ч | Б |
| Готовая | Не более 2 ч | В |

При этом в зависимости от вида смеси, загружаемой в АБС перед транспортированием, возможна его работа в трех режимах:

- включение барабана в пути следования или на строительном объекте за 10 – 20 мин до разгрузки (режим А);

- включение барабана непосредственно после его наполнения исходным материалом (режим Б);
- периодическое включение и выключение барабана во время транспортирования смеси до объекта (режим В).

Эти рекомендации не охватывают всех возможных технологических схем приготовления и транспортирования в АБС с пароразогревом бетонной смеси. При загрузке сухой смеси или холодной, компоненты которой содержат влагу, находящуюся в замерзшем состоянии, время нахождения в пути не ограничивается. Если будут загружаться компоненты и приготавливаться готовая смесь с пароразогревом на бетонном узле, то при назначении допустимого времени транспортирования необходимо кроме начальной температуры смеси учитывать характер воздействия пара на цемент и режим транспортирования.

Предельная продолжительность транспортирования бетонной смеси определяется временем начала ее схватывания (потери удобоукладываемости). Реологические свойства бетонных смесей зависят от пластических свойств цементного теста. СНиПом в приложении 3 [154] определены рекомендуемые области применения цементов для монолитных конструкций. Это, прежде всего, обычные, быстротвердеющие, пластифицированные портландцементы марок 300 ... 600 и обычные, быстротвердеющие шлакопортландцементы марок 200 ... 550.

Согласно требованиям ГОСТа для этих цементов, при испытании их в тесте нормальной густоты при температуре 20 °С начало схватывания должно быть не раньше 45 мин, а конец не позднее 10 ч. Требования стандарта в отношении сроков схватывания цементов представляют собой минимум его качества. Однако эти требования не подходят, когда рассматривают сроки схватывания бетонной смеси, которые значительно изменяются в зависимости от температуры и водоцементного отношения. При понижении температуры сроки схватывания замедляются, а при повышении – ускоряются. Быстрота схватывания связана главным образом с содержанием трехкальциевого алюмината [87].

Особенность бетонной смеси – постоянное изменение ее свойств с момента приготовления, что обусловлено протекающими сложными физико-химическими процессами. Бетонная смесь представляет собой многокомпонентную систему, состоящую из частиц вяжущего, новообразований, образующихся при гидратации вяжущего, зерен заполнителя, воды, вовлеченного воздуха, различных специальных добавок. Вследствие наличия

сил взаимодействия между дисперсными частицами твердой фазы и воды эта система приобретает связность и может рассматриваться как единое физическое тело с определенными реологическими, физическими и механическими свойствами.

Основное влияние на эти свойства будет оказывать количество и качество цементного теста, так как именно оно, являясь дисперсной системой, имеет высокоразвитую поверхность раздела твердой и жидкой фаз, что способствует развитию сил молекулярного сцепления и повышению связности системы. Решающее влияние на свойства бетонной смеси оказывает расход воды, так как он определяет объем и строение жидкой фазы, развитие сил сцепления, характеризующих связанность и подвижность всей системы.

В процессе гидратации цемента появляется все большее количество гелеобразных гидратных соединений новообразований, что способствует увеличению дисперсности твердой фазы и повышению клеящей и пластифицирующей способностей цементного теста и его связующей роли в бетонной смеси. Вместе с тем постепенно уменьшается подвижность смеси. Цементное тесто относят к так называемым структурированным системам [155], которые характеризуются некоторой начальной прочностью структуры. В цементном тесте создается определенная структура за счет действия сил молекулярного сцепления между частицами, окаймленными тонкими пленками воды. Пленки жидкой фазы создают непрерывную пространственную сетку в структуре цементного теста, придавая ему пластичность и способствуя формоизменению системы (течению) при приложении внешних силовых воздействий. Прочность начальной структуры, или структурная вязкость цементного теста, зависит от концентрации твердой фазы в водной суспензии.

Бетонные смеси, укладываемые в монолитные конструкции, должны иметь осадку конуса, согласно СНиП [154], от 0 до 24 см, что соответствует водоцементному отношению от 0,4 до 2 при приготовлении бетонной смеси без пластифицирующих добавок, и от 0,3 до 0,8 при применении пластифицирующих добавок [80]. Такие смеси содержат достаточное количество цементного теста и воды для создания сплошной среды, что позволяет отнести их к бетонным смесям первого и второго рода по классификации Ю.М. Баженова [155]. Эти смеси ведут себя подобно цементному тесту, обладая первоначальной прочностью структуры, определенной пластичностью и подвижностью.

Поведение структурированных систем при приложении внешних сил существенно отличается от поведения жидкостей, чья вязкость (жидкостей) зависит только от изменения температуры. Вязкость структурированных систем изменяется и от температуры, и от величины внешних сил, действующих на систему. Вязкость зависит от величины напряжений сдвига системы или скорости сдвиговых деформаций. При транспортировании пароразогретой смеси в АБС с периодическим включением и выключением барабана (режим В) под действием вращения будет происходить разрыхление первоначальной структуры и возрастание ее подвижности. При окончании вращения бетонная смесь будет возвращаться в исходное состояние, восстанавливаться начальная прочность структуры, уменьшаться подвижность.

Пароразогретая бетонная смесь, по данным исследователей [156], быстро теряет удобоукладываемость и остывает. Представляется, что оба факта имеют одну причину. Между разогретой смесью и окружающей средой наблюдается интенсивный тепло- и массообмен. Благодаря разности парциальных давлений нагретая вода переходит в парообразное состояние и испаряется, отнимая тепло у бетонной смеси. Потеря воды снижает и подвижность смеси. Так, по данным Л.А. Малининой и В.М. Зубенко [30, 156], смесь, разогретая до 65 °С, сразу после приготовления имеет жесткость 10 с, через 5 мин – 14 с, через 15 мин – 20 с, а температура понижается до 53 °С.

Вторая причина – увеличение водосодержания цементного теста в связи с ускорением процессов схватывания. От водопотребности пароразогретой смеси в значительной мере зависят композиционные и технологические параметры бетонной смеси. В свою очередь, водопотребность смеси определяется водопотребностью компонентов и уточняется при назначении того или иного состава бетонной смеси. Необходимо отметить, что при подборе состава бетона из пароразогретой смеси при неизменном расходе цемента некоторое повышение В/Ц за счет роста водопотребности пароразогретой смеси не снижает прочности бетона независимо от сроков твердения. Это связано с тем, что повышенное водосодержание пароразогретой смеси частично компенсируется ее меньшим воздухосодержанием, большей степенью гидратации, а также частичным испарением влаги при транспортировании, подаче, укладке и выдерживании пароразогретой бетонной смеси.

По данным С.А. Миронова и И.А. Киреенко [156, 157], водопотребность в интервале от 60 до 98 °С увеличивается на 20 – 34 %, что при расходе цемента 340 кг/м³ отвечает росту нормальной густоты на 7,8 %. Водопотребность зависит от минералогического состава цемента и температуры бетонной смеси. Так, в работе [105] отмечается, что при повышении температуры смеси на портландцементе завода «Большевик» (расход – 300 кг/м³) от 15 до 65 °С водопотребность увеличивается на 7 – 8 %, а водопотребность смеси на БТЦ Жигулевского завода – на 10 – 13 %. В связи с этим приходилось вводить дополнительную воду: в первом случае 11 – 13 л/м³, во втором – до 25 л/м³. При этом увеличивалось и В/Ц, соответственно, от 0,54 до 0,57 и от 0,6 до 0,68.

Ориентировочные данные по увеличению водосодержания пароразогретых бетонных смесей можно принимать по табл. 4.2 или определять опытным путем [158].

Таблица 4.2

*Ориентировочное увеличение расхода воды в бетонных смесях
в зависимости от температуры пароразогрева*

| Температура разогрева, °С | Увеличение расхода воды при марках бетона, % | | |
|------------------------------|--|-------------|-------|
| | В 7,5 – В 12,5 | В 15 – В 20 | В 25 |
| До 50 | 2 – 3 | 3 – 5 | 5 – 8 |
| 55 – 70 | 5 – 10 | 10 – 15 | – |
| 75 – 90 | 15 – 20 | 20 – 25 | – |

Как показали исследования и практика, на консистенцию пароразогретых смесей, а также прочность бетона из этих смесей оказывают влияние следующие технологические факторы: состав смеси, вид и состав цемента, качество заполнителей, температура смеси, транспортирование и укладка смеси в опалубку [132]. Отработаны приготвление горячих смесей на подогретых компонентах, последовательная загрузка в смеситель сухих компонентов, воды и время подачи пара [98, 159].

В этом случае наблюдаются быстрое повышение температуры цемента при контакте с водой, а также постепенное снижение температуры отдельных компонентов при относительно высокой температурной и структурной однородности. При последовательной загрузке в смеситель сухих компонентов и воды к моменту подачи пара цемент может быть частично гидратирован.

К специфическим особенностям приготовления и транспортирования пароразогретых бетонных смесей в АБС в зависимости от принятой технологической схемы можно отнести отсутствие или наличие периода гидратации при низкой температуре до разогрева; транспортирование холодных сухих, затворенных и разогретых смесей; нахождение смеси в режимах выдерживания, побуждения, перемешивания.

§ 4.2. Влияние пароразогрева на структурообразование бетона

Степень активации цемента зависит от увеличения удельной поверхности. На рис. 4.1 приведено значение коэффициента активации k_a .

$$k_a = \frac{R - R_0}{R_0} 100, \quad (4.1)$$

где R – прочность при дополнительном помоле, МПа; R_0 – прочность исходного цемента, МПа.

Коэффициент активации (см. рис. 4.1) рассчитан по данным Ю.М. Баженова [155, 160].

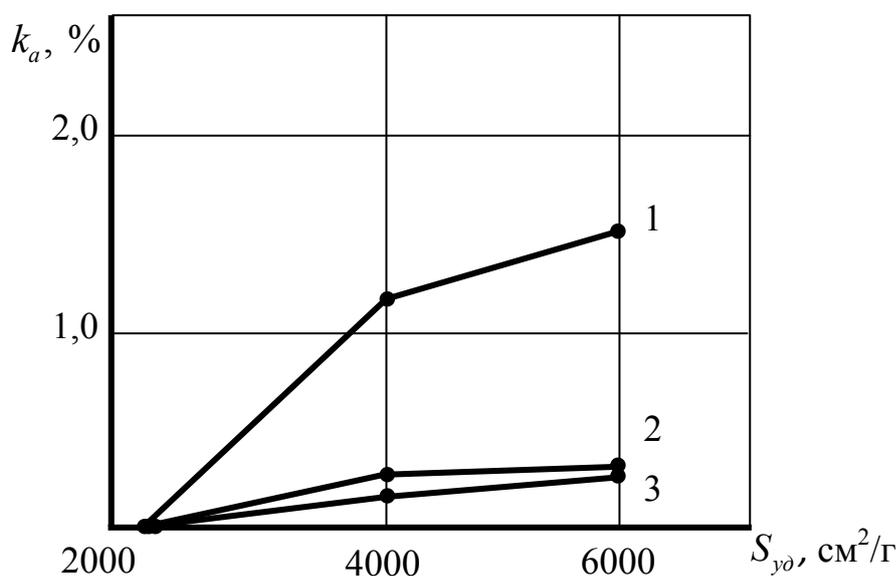


Рис. 4.1. Влияние дополнительного помола на активацию цемента: 1 – возраст 1 сутки; 2 – возраст 7 суток; 3 – возраст 28 суток

Более эффективен помол при увеличении удельной поверхности до 4000 см²/г. Дополнительный помол ускоряет набор прочности значительно, более чем в 1,5 раза в суточном возрасте и повышает прочность в 7-суточном

возрасте на 21,6 – 26,4 % при увеличении удельной поверхности с 2300 до 4300 и 6200 см²/г соответственно, а в 28-суточном возрасте соответственно на 13,1 и 25,3 % .

При исследовании физико-механических характеристик бетона из пароразогретой смеси был также использован активный эксперимент.

Для исследования влияния домола на прочность бетона был реализован пятифакторный план второго порядка. Условия опытов приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Условия опытов для оценки домола бетонной смеси

| Фактор | Код | Уровни | | | Интервал варьирования |
|--|-------|---------|-----|--------|-----------------------|
| | | - 1 | 0 | + 1 | |
| Расход цемента, кг/м ³ | x_1 | 320 | 400 | 525 | – |
| Активность цемента | x_2 | 400 | – | 500 | – |
| Вид заполнителя | x_3 | Известь | – | Гранит | – |
| Влажность бетонной смеси, %, от В/Ц | x_4 | 0 | 35 | 70 | 35 |
| Режим перемешивания, обороты смесителя | x_5 | 50 | 150 | 250 | 100 |

В бетономешалку загружались сухая смесь и смесь, имеющая 35 и 70 % от потребного количества воды. Они перемешивались со скоростью 9 об/мин до суммарного количества 250 оборотов.

В подвергнутую обработке смесь вводили недостающее количество воды и перемешивали в течение 90 с со скоростью 9 об/мин, что соответствовало реальным условиям разгрузки готовой бетонной смеси. Было принято решение об определении прочности бетона по результатам испытания кубиков, так как задачей исследования было выявление относительной взаимосвязи отдельных рассматриваемых факторов. Из бетонной смеси приготавливались образцы 10 × 10 × 10 см, которые выдерживались в камере нормального хранения.

Математические модели для оценки влияния домола в режиме перемешивания и исходного состояния смеси на прочность бетона в различном возрасте имеют следующий вид:

– в 3-суточном возрасте:

$$\begin{aligned}
y = & 13,795 - 0,795x_1 + 0,712x_2 - 0,339x_3 + 0,2x_4 - 0,695x_5 + \\
& + 2,34x_1^2 - 0,69x_2^2 - 0,74x_3^2 + 0,81x_4^2 + 2,26x_5^2 + \\
& + 0,644x_1x_5 + 0,644x_3x_4 - 0,606x_3x_5 + 0,38x_4x_5; \quad (4.2)
\end{aligned}$$

– 7-суточном возрасте:

$$\begin{aligned}
y = & 20,579 - 1,145x_1 + 0,951x_2 - 0,522x_3 + 0,239x_4 + 1,034x_5 - \\
& - 3,585x_1^2 - 0,635x_2^2 - 1,185x_3^2 + 0,865x_4^2 + 3,515x_5^2 + \\
& + 0,375x_1x_3 + 0,9125x_1x_5 - 0,425x_2x_3 - 0,9875x_3x_4; \quad (4.3)
\end{aligned}$$

– 28-суточном возрасте:

$$\begin{aligned}
y = & 31,9 - 1,768x_1 + 1,607x_2 - 0,862x_3 + 0,411x_4 - 1,679x_5 + \\
& + 5,3x_1^2 - 1,75x_2^2 - 1,65x_3^2 + 1,7x_4^2 + 5,5x_5^2 + 0,6375x_1x_3 + \\
& + 1,475x_1x_5 + 0,6875x_2x_3 + 0,45x_2x_4 - 1,41x_3x_4 - 1,3375x_3x_5 + 0,95x_4x_5; \quad (4.4)
\end{aligned}$$

Погрешность полученных выражений – $\pm 3,4$ % от значения показателя.

Анализ полученных уравнений показывает, что эффект домола возрастает при увеличении числа оборотов с 50 до 120 и более значим при использовании известкового щебня в качестве заполнителя. Влияние отдельных факторов возрастает при увеличении возраста бетона. Эффект домола составляет 24,4 – 25% при числе оборотов 50 и возрастает до 30 % при числе оборотов 120.

Эффективность домола при транспортировании в АБС показана на рис. 4.2.

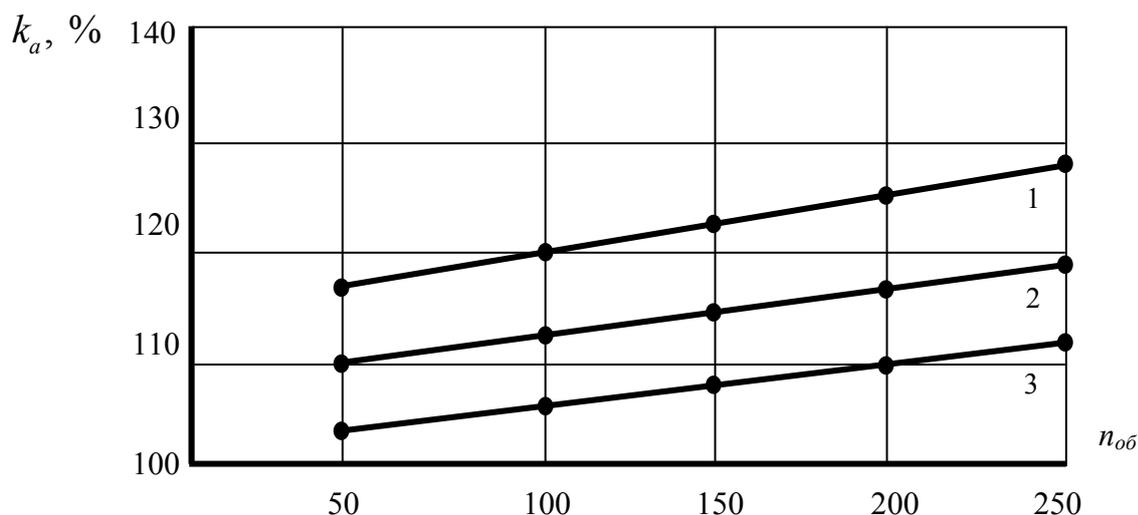


Рис. 4.2. Влияние побуждения на прочность бетона:
1 – расход цемента 320 кг/м³; 2 – расход цемента 400 кг/м³;
3 – расход цемента 525 кг/м³

Для исследования влияния отдельных технологических факторов на прочность бетона были проведены эксперименты с производственными составами, близкими к маркам бетона В 15, В 22,5, В 30 на шлакопортландцементе портландцементе Топкинского цементного завода, и портландцементе, Ульяновского цементного завода. Использовался щебень известковый Мелиховского карьера фракции 5 - 40 мм; природный песок Улыбышевского карьера с модулем крупности 1,26. Объемная масса сухого щебня – 1350 кг/м³, сухого песка – 1500 кг/м³. В качестве модифицирующей добавки использовался суперпластификатор С-3 (ТУ 6-14-625-80).

Для исследования влияния состава и температуры пароразогретой бетонной смеси на прочность бетона был реализован пятифакторный план второго порядка.

Матрица экспериментов приведена в табл. 4.4

Таблица 4.4

Условия опытов для оценки влияния состава и температуры

| Фактор | Код | Уровни | | | Интервал варьирования |
|-----------------------------------|-------|--------|------|-----|-----------------------|
| | | -1 | 0 | +1 | |
| Расход цемента, кг/м ³ | x_1 | 320 | 400 | 525 | – |
| Водоцементное отношение | x_2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,2 |
| Температура, °С | x_3 | 30 | 50 | 70 | 20 |
| Добавка С-3, % от массы цемента | x_4 | 0 | 0,35 | 0,7 | 0,35 |
| Выдержка до укладки, мин | x_5 | 0 | 15 | 30 | 15 |

При оценке влияния состава и температуры в бетономешалку загружались компоненты бетонной смеси и часть воды. После закрытия барабана крышкой в процессе перемешивания (150 – 170 оборотов) вводился пар из расчета достижения бетонной смесью температуры 30, 50, 70 °С.

После приготовления смесь выдерживалась в бетономешалке от 0 до 30 мин, укладывалась в формы, которые выдерживались в камерах твердения с влажностью 98 %, остывая со скоростью не более 1 °С/ч. Образцы испытывались на 3-и, 7-е, 28-е и 125-е сутки.

Для оценки влияния состава и температуры уравнение регрессии имеет вид:

- для прочности в 3-суточном возрасте:

$$y = 11,68 + 0,85x_1 - 0,62x_2 - 2,59x_4 - 0,99x_2^2 + 4,01x_4^2 + 0,38x_1x_4 + 0,65x_2x_3 + 1,0x_3x_5; \quad (4.5)$$

- 7-суточном возрасте:

$$y = 16,36 + 0,64x_1 - 0,82x_2 + 0,41x_3 - 2,51x_4 + 2,18x_1^2 + 1,03x_2^2 + 5,27x_3^2 + 2,98x_4^2 - 1,37x_5^2 - 1,07x_1x_2 + 0,74x_1x_3 - 0,47x_1x_4 + 0,53x_1x_5 + 1,04x_2x_5 - 0,42x_3x_4 - 0,38x_3x_5 - 0,69x_4x_5; \quad (4.6)$$

- 28-суточном возрасте:

$$y = 22,76 + 1,757x_1 - 1,2065x_2 + 0,528x_3 - 0,522x_4 + 0,745x_5 + 3,3x_1^2 + 1,455x_2^2 - 3,445x_3^2 + 0,705x_5^2 + 0,625x_1x_2 + 0,725x_1x_3 + 0,425x_1x_4 - 0,5125x_1x_5 - 1,225x_2x_4 + 1,2125x_2x_5. \quad (4.7)$$

Погрешности полученных выражений – $\pm 3,1$ % от значения показателя.

Анализ графиков (рис. 4.3 - 4.6) и уравнений регрессии показывает, что введение добавки замедляет набор прочности в 3-суточном возрасте на 40 %, значение введения добавки уменьшается к 28-суточному возрасту.

Ускорение набора прочности наблюдается при пароразогреве бетонной смеси свыше 30 °С. Наибольший прирост прочности – в 28-суточном возрасте при температуре 50 °С.

Пароразогрев бетонной смеси свыше 50 °С не дает эффекта ускорения набора прочности. Выдержка более благоприятно сказывается при уменьшении расхода цемента и увеличении В/Ц.

Проведенные исследования влияния обработки бетонной смеси паром на морозостойкость бетона из пароразогретой смеси были выполнены для условий $t_{\sigma.c.} = 50$ °С, выдержка до укладки – 15 мин, расход цемента – 400 кг/м³ с изменением пластификации пароразогретой смеси. Результаты экспериментов приведены в табл. 4.5.

Морозостойкость бетонов, приготовленных из пароразогретых смесей, незначительно отличается от морозостойкости бетона нормального твердения и во всех исследованных режимах удовлетворяет требованиям, предъявляемым к бетонам по морозостойкости.

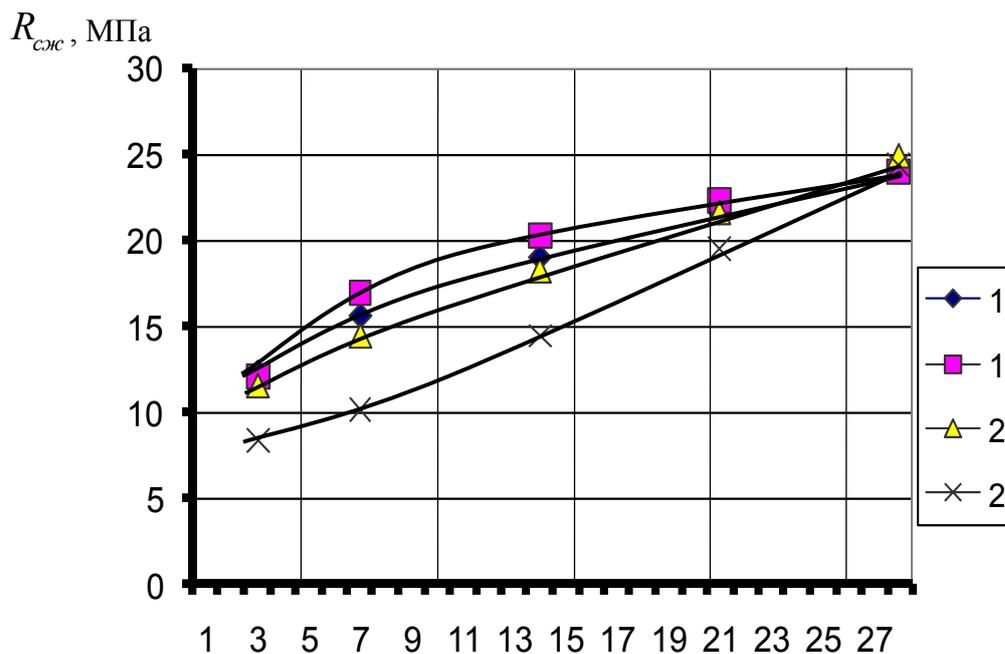


Рис. 4.3. Влияние состава (Ц - 320 кг/м³, П - 620 кг/м³, Щ - 1100 кг/м³, В - 130 л/м³), добавки (1, 1' - без доб., 2, 2' - доб. 2,2 кг/м³), выдержки (1', 2 - без выд., 1, 2' - выд. 30 мин), температуры (1, 2 - 30 °С, 1', 2' - 70 °С) на прочность бетона

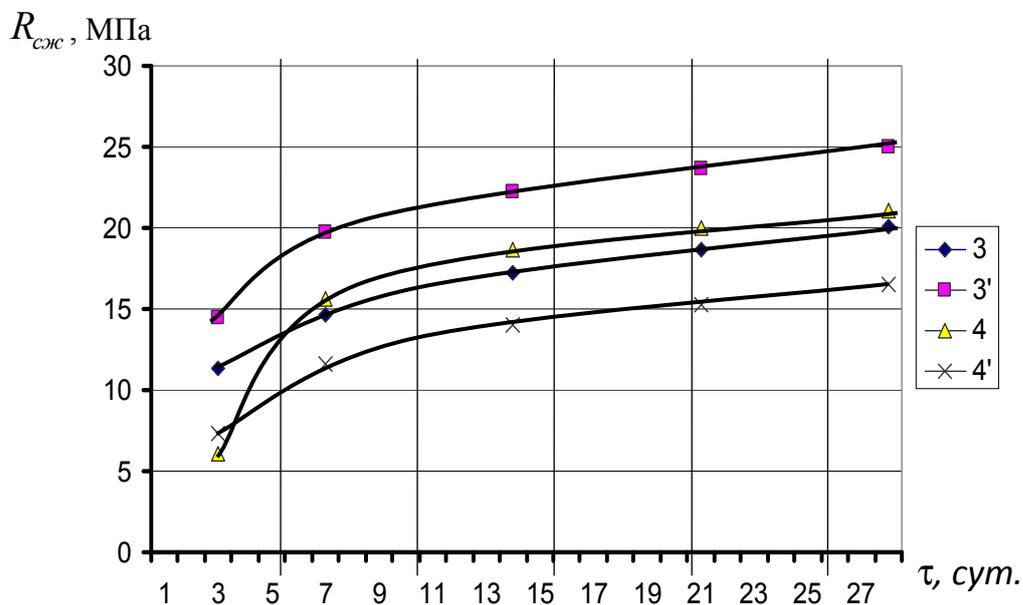


Рис. 4.4. Влияние состава (Ц - 320 кг/м³, П - 620 кг/м³, Щ - 1100 кг/м³, В - 260 л/м³), добавки (3, 3' - без доб., 4, 4' - доб. 2,2 кг/м³), выдержки (3, 4' - без выд., 3', 4 - выд. 30 мин), температуры (3, 4 - 30 °С, 3', 4' - 70 °С) на прочность бетона

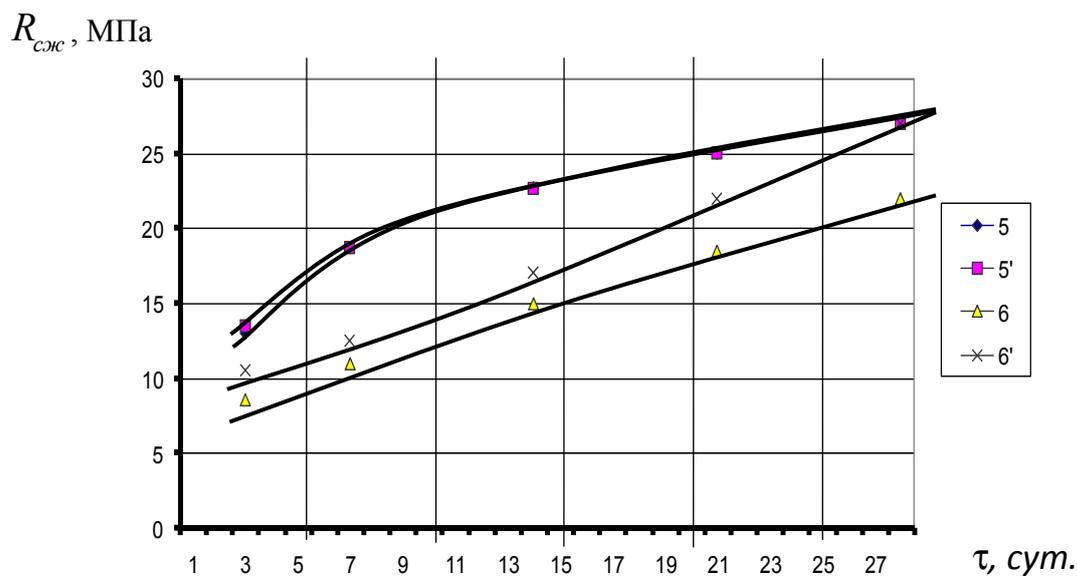


Рис. 4.5. Влияние состава (Ц - 525 кг/м³, П - 440 кг/м³, Щ - 1100 кг/м³, В - 420 л/м³), добавки (5, 5' - без доб., 6, 6' - доб. 3,6 кг/м³), выдержки (5', 6 - без выд., 5, 6' - выд. 30 мин), температуры (5, 6 - 30 °С, 5', 6' - 70 °С) на прочность бетона

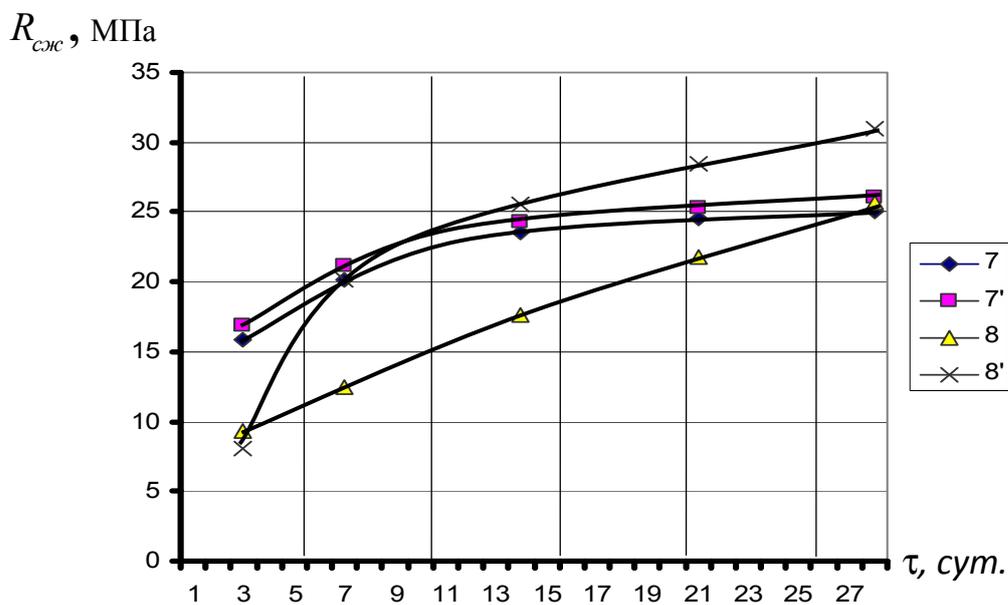


Рис. 4.6. Влияние состава (Ц - 525 кг/м³, П - 440 кг/м³, Щ - 1100 кг/м³, В - 210 л/м³), добавки (7, 7' - без доб., 8, 8' - доб. 3,6 кг/м³), выдержки (7, 8' - без выд., 7', 8 - выд. 30 мин), температуры (7, 8 - 30 °С, 7', 8' - 70 °С) на прочность бетона

Таблица 4.5

Влияние обработки бетонной смеси паром на морозостойкость бетона

| Условия обработки | Прочность в 28-суточном возрасте, МПа | Морозостойкость бетона, циклы | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---------------------------------------|-------------------------------|------|-----------------------------|------|-----------------|------|-----------------------------|------|-----------------|------|-----------------------------|------|-----------------|------|-----------------------------|------|
| | | 150 | | | | 200 | | | | 250 | | | | 300 | | | |
| | | Прочность, МПа | | Кoeffициент морозостойкости | | Прочность, МПа | | Кoeffициент морозостойкости | | Прочность, МПа | | Кoeffициент морозостойкости | | Прочность, МПа | | Кoeffициент морозостойкости | |
| После испытания | | После испытания | | После испытания | | После испытания | | После испытания | | После испытания | | После испытания | | После испытания | | После испытания | |
| В / Ц = 0,4 | 30,4 | 27,1 | 0,89 | 0,86 | 26,1 | 27,5 | 0,88 | 0,82 | 25,0 | 26,8 | 0,86 | 0,81 | 24,0 | 26,2 | 0,84 | 0,79 | 0,78 |
| Нормальное хранение | 31,2 | 28,4 | 0,91 | 0,88 | 27,5 | 29,4 | 0,95 | 0,85 | 26,8 | 28,4 | 0,88 | 0,81 | 26,2 | 28,7 | 0,86 | 0,82 | 0,78 |
| В / Ц = 0,6 | 29,1 | 23,0 | 0,79 | 0,75 | 21,8 | 23,0 | 0,79 | 0,72 | 21,0 | 21,8 | 0,75 | 0,72 | 20,4 | 20,4 | 0,70 | 0,70 | 0,70 |
| Нормальное хранение | 30,2 | 26,9 | 0,89 | 0,85 | 25,7 | 26,9 | 0,89 | 0,85 | 24,5 | 25,7 | 0,85 | 0,81 | 23,6 | 23,6 | 0,78 | 0,78 | 0,78 |
| С-3 = 0,35 % | 32,3 | 29,4 | 0,91 | 0,88 | 28,4 | 29,4 | 0,91 | 0,85 | 27,5 | 28,4 | 0,88 | 0,85 | 26,5 | 26,5 | 0,82 | 0,82 | 0,82 |
| Нормальное хранение | 34,7 | 33,3 | 0,96 | 0,95 | 33,0 | 33,3 | 0,95 | 0,93 | 32,3 | 33,0 | 0,95 | 0,93 | 31,6 | 31,6 | 0,91 | 0,91 | 0,91 |
| С-3 = 0,7 % | 33,4 | 31,1 | 0,93 | 0,91 | 30,4 | 31,1 | 0,93 | 0,88 | 29,4 | 30,4 | 0,91 | 0,88 | 28,7 | 28,7 | 0,86 | 0,86 | 0,86 |
| Нормальное хранение | 36,1 | 35,0 | 0,97 | 0,96 | 34,7 | 35,0 | 0,97 | 0,95 | 34,3 | 34,7 | 0,96 | 0,95 | 33,9 | 33,9 | 0,94 | 0,94 | 0,94 |

Проведенные исследования влияния обработки бетонной смеси паром на водопоглощение бетона были выполнены для аналогичных условий, что и при исследовании морозостойкости. Результаты экспериментов представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

*Влияние обработки бетонной смеси паром
на водопоглощение бетона*

| Условия обработки | Продолжительность выдержки, мин | Водопоглощение, % | Коэффициент водопоглощения |
|---------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------------|
| В/Ц = 0,4 | 0 | 5,12 | 1,16 |
| | 15 | 4,88 | 1,11 |
| | 30 | 4,71 | 1,07 |
| В/Ц = 0,6 | 0 | 6,16 | 1,40 |
| | 15 | 5,98 | 1,36 |
| | 30 | 5,89 | 1,34 |
| В/Ц = 0,8 | 0 | 6,78 | 1,54 |
| | 15 | 6,51 | 1,48 |
| | 30 | 6,38 | 1,45 |
| С - 3 = 0,35 % | 0 | 4,67 | 1,06 |
| | 15 | 4,62 | 1,05 |
| | 30 | 4,57 | 1,04 |
| С - 3 = 0,7 % | 0 | 5,22 | 1,09 |
| | 15 | 4,75 | 1,08 |
| | 30 | 4,71 | 1,07 |
| Нормальное хранение | – | 4,40 | 1,00 |

Данные экспериментов по водопоглощению дают определенное представление о поровой структуре бетона из пароразогретых смесей. Характеристики водопоглощения бетона, отражающие открытость его пор, согласуются по тем же закономерностям с характеристиками морозостойкости. Увеличение водосодержания пароразогретой бетонной смеси увеличивает водопоглощение более чем на 40 % при изменении В/Ц с 0,4 до 0,8. Замена воды с целью увеличения пластификации пароразогретой бетонной смеси суперпластификатором С-3 даже в количестве 0,35 % от массы цемента, снижает коэффициент водопоглощения почти до уровня бетона нормального хранения.

Анализ взаимного соответствия коэффициентов морозостойкости и водопоглощения бетонов, приготовленных из пароразогретых смесей, показывает, что увеличение В/Ц с 0,4 до 0,6 увеличивает коэффициент водопоглощения с 1,07 до 1,4 при снижении коэффициента морозостойкости и испытании морозостойкости бетона 150 циклов с 0,89 до 0,79, а при – 300 циклах – с 0,79 до 0,70.

Коэффициенту водопоглощения 1,04, полученному при замене воды суперпластификатором в количестве лишь 0,35 % от массы цемента, соответствует высокий коэффициент морозостойкости при 150 циклах – 0,91, а при 300 циклах – 0,82.

Проведенные исследования и полученные графические зависимости выявили следующие закономерности:

1. Исследование влияния режимов смешивания на однородность пароразогретой бетонной смеси показало, что при пропорциональной загрузке холодной смесью компонентов из предварительно высушенных заполнителей однородность смеси достигается быстрее, чем при последовательной загрузке смеси компонентов с начальной влажностью; достаточное смешивание в режиме перемешивания происходит за меньшее суммарное число оборотов, чем в режиме побуждения; с увеличением влажности смеси однородность ее уменьшается.

2. Подача пара в смесь приводит к более быстрому (за меньшее число оборотов барабана) смешиванию, чем подача пара на смесь; последовательное введение пара и воды ведет к более быстрому смешиванию, чем одновременное введение пара и воды; наименьшее число оборотов барабана для получения однородной смеси достигается при последовательном введении пара в смесь и воды при вращении барабана в режиме перемешивания.

3. Пароразогрев смеси позволяет добиться лучшей однородности смеси при смешивании за более короткое время; при последовательной загрузке смесью компонентов с повышенной влажностью заполнителей необходимой однородности смеси (изменение объемной массы меньше 1 %) можно добиться только при пароразогреве смеси; смешивание зависит от этапа пароразогрева. Изменение объемной массы – минимальное при побуждении после 200 оборотов; оно получено при пропорциональной загрузке сухой смеси и подаче пара в нее.

4. Проведенные исследования влияния домола на прочность бетона показали, что эффект домола возрастает при увеличении числа оборотов с

50 до 120 и более значим при использовании известкового щебня в качестве заполнителя. Влияние отдельных факторов возрастает при увеличении возраста бетона. Эффект домола составляет 24,4 – 25 % при числе оборотов 50 и увеличивается до 30 % при числе оборотов 120.

5. Исследования влияния состава и температуры пароразогретой бетонной смеси на прочность бетона показывают, что введение добавки замедляет набор прочности в 3-суточном возрасте на 40 %, значение введения добавки уменьшается к 28-суточному возрасту.

6. Ускорение набора прочности наблюдается при пароразогреве бетонной смеси свыше 30 °С. Наибольший прирост прочности в 28-суточном возрасте – при температуре 50 °С. Пароразогрев бетонной смеси свыше 50 °С не дает эффекта ускорения набора прочности.

7. Выдержка более благоприятно сказывается при уменьшении расхода цемента и увеличении В/Ц. Морозостойкость бетонов, приготовленных из пароразогретых смесей, незначительно отличается от морозостойкости бетона нормального твердения и во всех исследованных режимах удовлетворяет требованиям, предъявляемым к бетонам по морозостойкости. Характеристики водопоглощения бетона, отражающие открытость его пор, согласуются по тем же закономерностям с характеристиками морозостойкости.

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЬ – АВТОБЕТОНОНАСОС

§ 5.1. Исследование тепломассообменных процессов при пароразогреве бетонной смеси в автобетоносмесителях

Выделение теплоты при фазовом превращении пара неразрывно связывает процесс теплообмена с конденсацией пара. Конденсация – это процесс перехода пара в жидкое состояние (фазовый переход первого рода).

Конденсация может происходить как в объеме пара, так и на охлаждаемой поверхности теплообмена. В первом случае образование конденсированной фазы может происходить самопроизвольно при значительном переохлаждении пара относительно температуры насыщения и на холодных жидких или твердых частицах, вводимых в пар.

В технике чаще встречается конденсация пара в жидкое состояние на охлаждаемых поверхностях теплообмена. Конденсация насыщенного или перегретого пара на твердой поверхности теплообмена происходит, если температура поверхности меньше температуры насыщения при данном давлении. На поверхности может образоваться пленка конденсата толщиной, намного превышающей расстояние эффективного действия межмолекулярных сил. В ряде случаев поверхность может быть покрыта отдельными каплями конденсата.

Первый вид конденсации, при которой жидкая конденсированная фаза образуется на поверхности теплообмена в виде устойчивой пленки, – пленочная конденсация, а второй – когда происходит образование капель – капельная. Пленочная конденсация возникает, если конденсат смачивает поверхность теплообмена. Если же смачивания не происходит, возникает капельная конденсация.

Конденсатообразующими поверхностями в АБС при пароразогреве являются¹ (рис. 5.1) внутренние поверхности смесительного барабана (наклонные, вертикальные и горизонтальные) – $F_{брб}$; вертикальные поверхности лопастей – $F_{лоп}$ и горизонтальная (в статическом состоянии) или на-

¹ Работа выполнялась совместно с д-ром техн. наук Б.М. Красновским.

клонная (в процессе побуждения или перемешивания) свободная поверхность бетонной смеси – $F_{бет}$ (рис. 5.1).

Конденсатообразующие поверхности $F_{брб}$, $F_{лоп}$ и $F_{бет}$ различно ориентированы относительно направления действия силы тяжести, в связи с чем характер стока конденсата будет также различным, что, в свою очередь, приведет к различию толщин конденсатной пленки и, соответственно, к различию коэффициентов теплоотдачи.

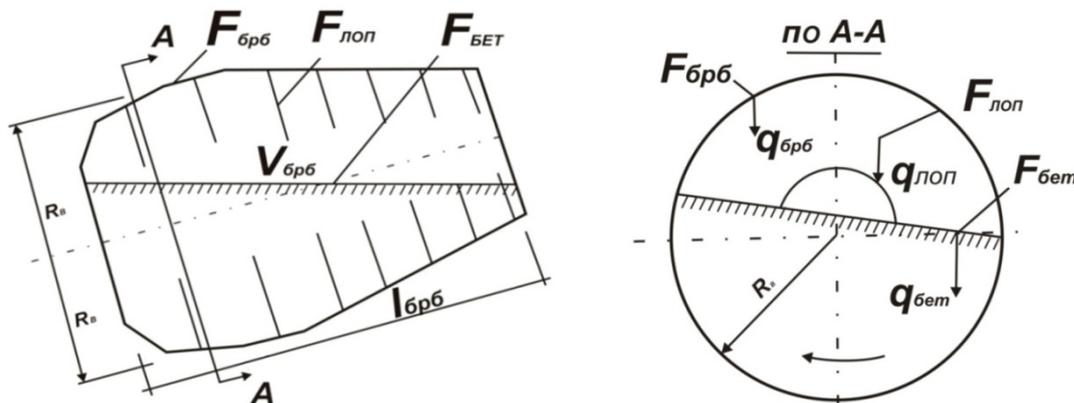


Рис. 5.1. Реальная схема смесительного барабана АВС

На внутренних поверхностях барабана АВС, как правило, возникает пленочная конденсация, т.к. все поверхности покрыты тонким слоем хорошо смачиваемого цементного теста (или цементного молока).

Коэффициент теплоотдачи пленки, конденсирующейся на внутренней поверхности смесительного барабана, где сток осуществляется капельным путем в результате преодоления силы поверхностного натяжения, может быть определен так, как предлагает В.Д. Попов [161] и с учетом поправки на центробежную силу, возникающую при вращении барабана:

$$\alpha_{брб} = 0,149 \left[\frac{\lambda^3 \rho' (g - v^2/R) r}{v \Delta t \sqrt{\sigma/\rho}} \right]^{0,25}, \quad (5.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности пленки конденсата, Вт/м·°С; ρ' – плотность конденсатной пленки, конденсирующейся на стенке лопасти, вращающейся вместе с барабаном, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м²/с; v – окружная скорость точки А, удаленной от центра вращения системы на расстояние R , м/с; r – теплота конденсации (парообразования), кДж/кг; ν – кинематическая вязкость, м²/с; Δt – разность температур пара и средней температуры стенки, °С; σ – коэффициент поверхностного натяже-

ния пленки конденсата, кг/м; ρ – плотность конденсатной пленки, конденсирующейся на внутренней поверхности смесительного барабана, кг/м³.

Коэффициент теплоотдачи пленки, конденсирующейся на лопастях смесительного барабана АБС, может быть определен так, как это принято В. Нуссельтом [108, 162, 163] для конденсации на вертикальной стенке:

$$\alpha_{ст} = 1,33\lambda \left(\frac{1}{4} \frac{\nu}{\alpha} \frac{g}{Lv} \frac{r}{c \Delta t} \right)^{0,25}, \quad (5.2)$$

где Δt – разность температур пара и средней температуры стенки, °С; α – температуропроводность влажного воздуха при 100 °С, м²/ч; L – высота стенки, м; при расчете на единицу поверхности $l = 1$; c – объемная теплоемкость бетонной смеси, Вт·ч/м³·°С.

При определенных скоростях вращения смесительного барабана на каждую микрочастицу конденсатной пленки, находящейся на лопасти, начнет действовать центробежная сила, направленная против силы тяжести и противодействующая стеканию конденсата.

На рис. 5.2 представлен элемент стенки лопасти, вращающейся вместе с барабаном в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка так, что центробежная сила направлена вертикально вверх от точки А, и расположенный под углом β к горизонту так, что в начале оси координат толщина конденсатной пленки равна нулю, а на расстоянии x толщина равна δ .

Сила тяжести P_1 , действующая на элемент стенки столбика dx конденсата на расстоянии $(\delta - y)$, будет:

$$P_1 = (\delta - y)\rho'gdx, \quad (5.3)$$

а в направлении оси x

$$P_1 \sin \beta = (\delta - y)\rho'g \sin \beta dx. \quad (5.4)$$

Сдерживающими в направлении оси x силами являются сила сопротивления сдвигу слоев жидкости конденсата P_2 , определяемая в соответствии с законом Ньютона [164] как

$$P_2 = \mu \frac{du}{dy} dx, \quad (5.5)$$

где μ – динамическая вязкость, Па; du/dy – градиент скорости u по нормали к направлению потока и центробежная сила P_3 , проекция которой на направлении оси x составит

$$P_3 \sin \beta = (\delta - y)\rho' \frac{v^2}{R} \sin \beta dx, \quad (5.6)$$

где v – окружная скорость точки А, удаленной от центра вращения системы на расстояние R .

Из условия равновесия находим

$$P_3 \sin \beta + P_2 = P_1 \sin \beta,$$

$$(\delta - y) \rho' \frac{v^2}{R} \sin \beta dx + \mu \frac{du}{dy} dx = (\delta - y) \rho' g \sin \beta dx,$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{\rho' \sin \beta}{\mu} (\delta - y) \left(g - \frac{v^2}{R} \right)$$

и после интегрирования

$$u = \frac{\rho' \sin \beta}{\mu} \left(\delta y - \frac{1}{2} y^2 \right) \left(g - \frac{v^2}{R} \right) + C,$$

а так как при $y = 0$ имеем $u = 0$ и, следовательно, $C = 0$, то общее количество жидкости Q , проходящее над поверхностью, составит

$$Q = \int_0^\delta \rho' u dy = \frac{(\rho')^2 \sin \beta \cdot \delta^3}{3\mu} \left(g - \frac{v^2}{R} \right). \quad (5.7)$$

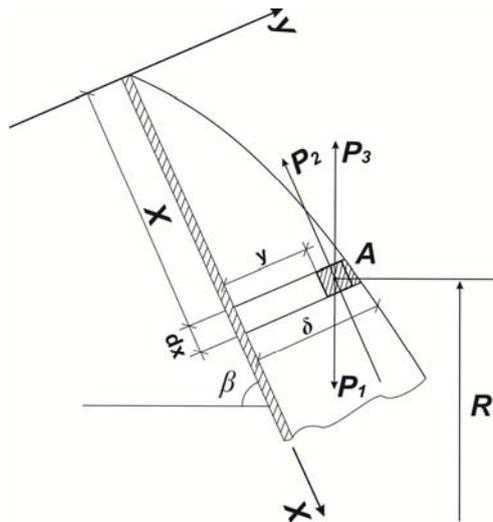


Рис. 5.2. Элемент стенки лопасти смесительного барабана АВС

Далее, по аналогии с тем, как это решено, например в работах [162, 163], можно вывести, что коэффициент теплоотдачи конденсатной пленки на лопастях смесительного барабана АВС, вращающейся с окружной скоростью v ,

$$\alpha_{\text{лоп}} = 1,33\lambda \left[\frac{1}{4} \frac{v}{\alpha} \frac{\left(g - \frac{v^2}{R} \right) r}{lv^2} \frac{r}{c\Delta t} \right]^{0,25}, \quad (5.8)$$

где динамическая μ и кинематическая ν вязкости связаны соотношением $\mu = \nu\rho$.

Процесс теплообмена в ходе пленочной конденсации неподвижного пара на поверхности лопастного оперения АБС может быть определен так, как предлагается В.П. Исаченко² [165] для вертикальной плоской стенки.

На вертикальной стенке, температура поверхности которой всюду равна T_C , конденсируется сухой насыщенный пар (рис. 5.3) с температурой насыщения T_H .

Для нахождения температурного поля, поля скоростей движения пленки и, наконец, собственно коэффициента теплообмена используют дифференциальные уравнения энергии и движения. В результате целого ряда допущений имеют уравнение энергии

$$\frac{d^2T}{dy^2} = 0 \quad (5.9)$$

и уравнение движения

$$\mu_{ж} \frac{d^2w_x}{dy^2} = -\rho_{ж}g, \quad (5.10)$$

где w_x – скорость движения пленки по поверхности x ; $\rho_{ж}$ – плотность конденсатной пленки; g – ускорение свободного падения; $\mu_{ж}$ – динамическая вязкость жидкости при следующих граничных условиях: при $y = 0$ $T = T_C$ и $w_x = 0$; при $y = \delta$ $T = T_H$ и $\partial w_x / \partial y = 0$.

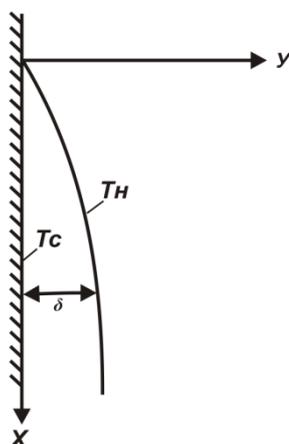


Рис. 5.3. К расчету процесса теплообмена при пленочной конденсации на вертикальной плоской стенке

Интегрирование уравнения энергии (5.9) при записанных выше граничных условиях дает

$$\frac{dT}{dy} = \frac{T_H - T_C}{\delta}, \quad (5.11)$$

² Впервые эта задача была решена в 1916 г. В. Нуссельтом.

Коэффициент теплоотдачи в соответствии с законом Ньютона – Рихмана и с учетом (5.11)

$$\alpha = \frac{q_c}{T_H - T_C} = \frac{\lambda_{ж} \frac{dT}{dy}}{T_H - T_C} = \frac{\lambda_{ж} T_H - T_C}{\delta T_H - T_C} = \frac{\lambda_{ж}}{\delta}, \quad (5.12)$$

где $\lambda_{ж}$ – теплопроводность жидкой фазы (пленки); q_c – плотность теплового потока на границе стенка-пленка; δ – толщина пленки.

Таким образом, если поперек пленки теплота переносится только теплопроводностью, то

$$\alpha = \frac{\lambda_{ж}}{\delta}, \quad (5.13)$$

т.е. коэффициент теплоотдачи в определенной точке поверхности теплообмена прямо пропорционален коэффициенту теплопроводности и обратно пропорционален толщине пленки конденсата в этой точке.

Толщина пленки конденсата будет зависеть от количества образовавшегося конденсата или расхода конденсата в интересующем нас сечении. Количество конденсата G , протекающего в единицу времени через поперечное сечение пленки при ширине последней, равной единице, определяется выражением

$$G = \rho_{ж} \bar{w} \delta \cdot 1, \quad (5.14)$$

где \bar{w} – средняя скорость течения пленки.

Через сечение, лежащее ниже на величину dx , жидкости протекает больше на

$$dG = d(\rho_{ж} \bar{w} \delta). \quad (5.15)$$

Этот прирост расхода происходит за счет конденсации. Если полагать, что тепло, отданное стенке, есть теплота фазового перехода, то

$$dG = \frac{q_c}{r} dx \cdot 1, \quad (5.16)$$

где q_c/r – количество конденсата, образующегося на единице поверхности теплообмена за единицу времени; r – теплота конденсации (парообразования).

Из (5.12) следует, что

$$q_c = \lambda_{ж} \frac{dT}{dy} = \frac{\lambda_{ж}}{\delta} (T_H - T_C), \quad (5.17)$$

подставив которое в (5.16), получим:

$$dG = \frac{\lambda_{ж}}{\delta} \frac{1}{r} (T_H - T_C) dx. \quad (5.18)$$

Приравняв правые части уравнений (5.15) и (5.18), получим:

$$d(\rho_{ж} \bar{w} \delta) = \frac{\lambda_{ж}}{\delta} \frac{1}{r} (T_H - T_C) dx. \quad (5.19)$$

Для того чтобы проинтегрировать последнее уравнение, предварительно нужно определить среднюю скорость движения пленки \bar{w} .

В уравнении движения (5.10) комплекс $\rho_{жg}/\mu_{ж}$ согласно условию – величина постоянная. В этом случае интегрирование дает:

$$\frac{dw_x}{dy} = -\frac{\rho_{жg}}{\mu_{ж}}y + C_1, \quad w_x = -\frac{\rho_{жg}}{2\mu_{ж}}y^2 + C_1y + C_2.$$

Используя граничные условия, получаем:

$$C_1 = \frac{\rho_{жg}}{\mu_{ж}}\delta, \quad C_2 = 0.$$

Распределение скоростей тогда будет следующим:

$$w_x = \frac{\rho_{жg}}{\mu_{ж}}\delta y - \frac{\rho_{жg}}{2\mu_{ж}}y^2.$$

Средняя скорость течения \bar{w} в сечении x равна

$$\bar{w} = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta w_x dy = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta \frac{\rho_{жg}}{\mu_{ж}}\delta y dy - \frac{1}{\delta} \int_0^\delta \frac{\rho_{жg}}{2\mu_{ж}}y^2 dy = \frac{\rho_{жg}}{3\mu_{ж}}\delta^2. \quad (5.20)$$

Подстановка полученного значения \bar{w} в уравнение (5.19) дает:

$$d\left(\frac{\rho_{жg}^2\delta^3}{3\mu_{ж}}\right) = \frac{\lambda_{ж}}{\delta} \frac{1}{r} (T_H - T_C) dx$$

или

$$\frac{r\rho_{жg}^2}{\lambda_{ж}\mu_{ж}}\delta^3 d\delta = (T_H - T_C) dx.$$

Проинтегрировав это уравнение, получим

$$\frac{r\rho_{жg}^2}{4\lambda_{ж}\mu_{ж}}\delta^4 = (T_H - T_C)x + C.$$

Из условия, что при $x = 0$ $\delta = 0$, следует, что $C = 0$. Решив последнее уравнение относительно δ и учитывая значение постоянной интегрирования, будем иметь:

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{4\lambda_{ж}\mu_{ж}(T_H - T_C)x}{r\rho_{жg}^2}}. \quad (5.21)$$

Подставив значение δ в (5.13), получим уравнение для коэффициента теплоотдачи в точке x , т.е. для местного коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_x = \sqrt[4]{\frac{r\rho_{жg}^2\lambda_{ж}^3}{4\mu_{ж}(T_H - T_C)x}}, \quad (5.22)$$

и, наконец, средний коэффициент теплоотдачи на стенке высотой L найдем, проинтегрировав (5.22):

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L} \int_0^L \alpha_x dx = \frac{4}{3} \sqrt[4]{\frac{r\rho_{жg}^2\lambda_{ж}^3}{4\mu_{ж}(T_H - T_C)L}} = \frac{4}{3} \left(\frac{r\rho_{жg}\lambda_{ж}^3}{4\nu_{ж}\Delta TL} \right)^{0,25}, \quad (5.23)$$

где $\nu_{ж} = \mu_{ж}/\rho_{ж}$ – кинематический коэффициент вязкости.

Таким образом, коэффициент теплопередачи пара, конденсирующегося на лопастях смесительного барабана АБС $\alpha_{лоп}$, можно записать:

$$\alpha_{лоп} = \frac{4}{3} \left(\frac{r\rho_{жg}\lambda_{ж}^3}{4\nu_{ж}\Delta TL} \right)^{0,25}, \quad (5.24)$$

где физические константы $\lambda_{ж}, \rho_{ж}, \nu_{ж}$ – функция средней температуры конденсатной пленки.

Коэффициент теплоотдачи пленки, конденсирующейся на движущейся свободной поверхности бетонной смеси, может быть определен зависимостью, выведенной И.Б. Заседателевым [106]:

$$\alpha_{бет} = 14,3\lambda \left(\frac{v_n\sqrt{F}}{\nu}\right)^{0,4} \left(\frac{t_m}{t_c}\right)^{3,8} \left(\frac{r}{c\Delta t}\right)^{0,36} \quad (5.25)$$

где F – поверхность теплообмена, m^2 , при расчетах на единицу площади принимается $F = 1$; v_n – скорость движения пара относительно поверхности бетона, m/c ; t_m, t_c – температуры мокрого и сухого термометров соответственно.

Входящая в (5.25) скорость движения пара v_n применительно к условиям конденсации на движущейся свободной поверхности должна учитывать оба движения: собственную скорость паровой среды $v_{п.с}$ и скорость движения поверхности бетонной смеси $v_{б.п}$:

$$v_{б.п} = nR'/10, \quad (5.26)$$

где R' – приведенный радиус смесительного барабана АБС, тогда

$$v_n = v_{п.с} + v_{б.п} = v_{п.с} + nR'/10, \quad (5.27)$$

$$\alpha_{бет} = 14,3\lambda \left(\frac{1}{\nu}\right)^{0,4} \left(v_{п.с} + \frac{nR'}{10}\right)^{0,4} \left(\frac{t_m}{t_c}\right)^{3,8} \left(\frac{r}{c\Delta t}\right)^{0,36}. \quad (5.28)$$

Исследованиями [165, 90] установлено, что коэффициент теплоотдачи пара при конденсации на горизонтальной поверхности на 30 – 40 % ниже, чем на вертикальной, поэтому коэффициент теплопередачи пара, конденсирующегося на свободной поверхности бетонной смеси $\alpha_{бет}$, можно определить как:

$$\alpha_{бет} = \left(\frac{1}{4} \frac{r\rho_{ж}g\lambda_{ж}^3}{\nu_{ж}\Delta TL}\right)^{0,25}. \quad (5.29)$$

Коэффициент теплопередачи пара, конденсирующегося на наклонных внутренних поверхностях барабана смесителя, для практических расчетов можно принять как среднее между $\alpha_{лоп}$ и $\alpha_{бет}$:

$$\alpha_{брб} = \frac{\alpha_{лоп} + \alpha_{бет}}{2} = \frac{7}{6} \left(\frac{1}{4} \frac{r\rho_{ж}g\lambda_{ж}^3}{\nu_{ж}\Delta TL}\right)^{0,25}. \quad (5.30)$$

Полученное теоретически выражение коэффициента теплопередачи (5.23) рассчитано для гладкой полированной поверхности. С.С. Кутателадзе полагает [90], что реальный коэффициент α должен быть определен как

$$\alpha = \bar{\alpha} k_{ш}, \quad (5.31)$$

где $k_{ш}$ – коэффициент шероховатости; при полированной гладкой поверхности $k_{ш} = 1$, при естественной поверхности $k_{ш} = 0,6$.

Внутренние поверхности барабана смесителя и свободная поверхность бетонной смеси далеки как от идеальной полированной, так и от нейтрально-«естественной», представляя собой пористые бугристо-рельефные плоскости затвердевшей корки цементного молока. Коэффициент шероховатости для них может быть принят

$$k_{ш} = 0,4. \quad (5.32)$$

Имеется еще один фактор, отрицательно сказывающийся на интенсивности теплопередачи при конденсации: если в паре находится какой-либо неконденсирующийся газ, например воздух, то теплоотдача конденсирующегося пара на поверхности тела будет снижаться. Из исследований [165, 90] известно, что даже весьма незначительное содержание воздуха в водяном паре заметно снижает коэффициент теплопередачи. Барабан АБС представляет собой замкнутый грушевидный объем, сообщение с атмосферным воздухом которого происходит только через загрузочно-разгрузочное отверстие, поэтому подсос воздуха ориентировочно может быть оценен коэффициентом

$$k_{в} = 0,8. \quad (5.33)$$

Реальный коэффициент теплопередачи пара, конденсирующегося на внутренних поверхностях барабана АБС, с учетом снижения его вследствие шероховатости конденсирующих поверхностей и подсоса воздуха определяется как

$$\alpha_i = \bar{\alpha}_i k_{ш} k_{в} = 0,32 \bar{\alpha}_i, \quad (5.34)$$

где индекс i относит коэффициент к поверхностям барабана ($\alpha_{брб}$), лопастям ($\alpha_{лоп}$) и поверхности бетонной смеси ($\alpha_{бет}$).

Воспользовавшись (5.24, 5.29 и 5.30), с учетом (5.34) можно записать:

$$\alpha_{брб} = 0,385 \left(\frac{1}{4} \frac{r \rho_{ж} g \lambda_{ж}^3}{v_{ж} \Delta T L} \right)^{0,25}, \quad (5.35)$$

$$\alpha_{лоп} = 0,44 \left(\frac{1}{4} \frac{r \rho_{ж} g \lambda_{ж}^3}{v_{ж} \Delta T L} \right)^{0,25}, \quad (5.36)$$

$$\alpha_{бет} = 0,33 \left(\frac{1}{4} \frac{r \rho_{ж} g \lambda_{ж}^3}{v_{ж} \Delta T L} \right)^{0,25}. \quad (5.37)$$

Величина температурного перепада Δt между температурой пара $t_{п}$ и средней за период разогрева температурой среды t_c позволяет, с учетом предложенных С.С. Кутателадзе [90] поправочных коэффициентов на загрязненность и шероховатость поверхностей $k_{ш} = 0,6$, определить удельный приход пара q на единицу поверхности конденсатообразования:

$$q_{\text{брб}} = \alpha_{\text{брб}} \Delta t k_{\text{ш}}, \text{ Вт/м}^2 \text{ (кг/м}^2 \cdot \text{ч)}, \quad (5.38)$$

$$q_{\text{лоп}} = \alpha_{\text{лоп}} \Delta t k_{\text{ш}}, \text{ Вт/м}^2 \text{ (кг/м}^2 \cdot \text{ч)}, \quad (5.39)$$

$$q_{\text{бет}} = \alpha_{\text{бет}} \Delta t k_{\text{ш}}, \text{ Вт/м}^2 \text{ (кг/м}^2 \cdot \text{ч)}. \quad (5.40)$$

Полученные значения коэффициентов теплопередачи определяют интенсивность конденсации при заданных физических константах и определенном температурном напоре ΔT . Общее количество выделяемого при конденсации тепла будет зависеть от площади поверхности, на которой происходит конденсация, и от продолжительности процесса. Если объем барабана смесителя заполнен почти полностью (рис. 5.4, а), площадь поверхностей конденсации F чрезвычайно мала и приток тепла окажется незначительным. Напротив, если барабан заполнен малым объемом смеси (рис. 5.4, б), площадь конденсатообразующих поверхностей велика - ими является почти вся внутренняя поверхность барабана смесителя. Задача заключается в определении такого коэффициента заполнения барабана смесителя k_3 , выражающегося через угол φ , который оставит площадь конденсатообразующих поверхностей F (рис. 5.4, в), достаточную для выделения требуемого количества тепла Q за установленное время τ .

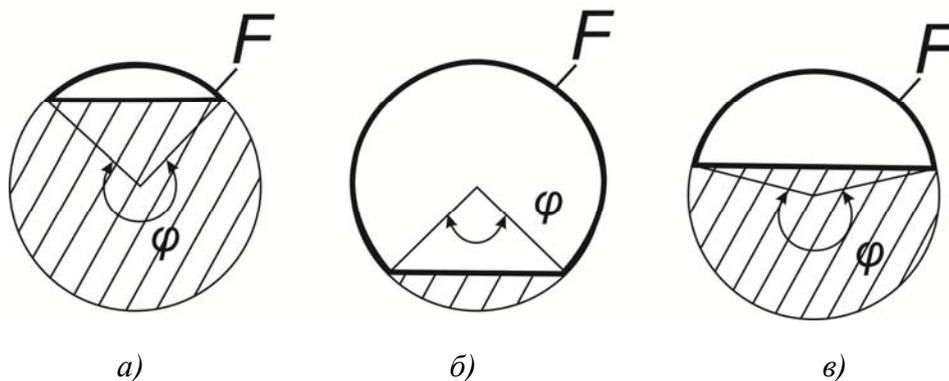


Рис. 5.4. К определению технологических параметров

Для последующих расчетов приведем реальную геометрию барабана смесителя (см. рис. 5.1) к расчетной (рис. 5.5) путем следующих допущений³:

- сложная геометрия барабана объемом $V_{\text{брб}}$ и длиной $l_{\text{брб}}$, состоящего из трех усеченных конусов и одного цилиндра различных радиусов,

³ Применение допущений вызывается необходимостью создания унифицированной методики расчета, используемой для различных конструкций смесительных барабанов АБС.

сводится к круговому цилиндру с приведенным радиусом R' , той же длиной $l_{брб}$ и с сохранением геометрического объема $V_{брб}$, так что

$$R' = \sqrt{V_{брб}/\pi l_{брб}}; \quad (5.41)$$

- количество лопастей сохраняется без изменений, высота лопасти принимается равной $0,5R'$;

- свободная поверхность бетонной смеси принимается плоской, и площадь ее определяется длиной барабана $l_{брб}$ и коэффициентом заполнения k_3 :

$$k_3 = V_{бет}/V_{брб}, \quad (5.42)$$

при $k_3 = 0,5$ площадь свободной поверхности бетонной смеси составляет $F_{бет} = 2R' l_{брб}$.

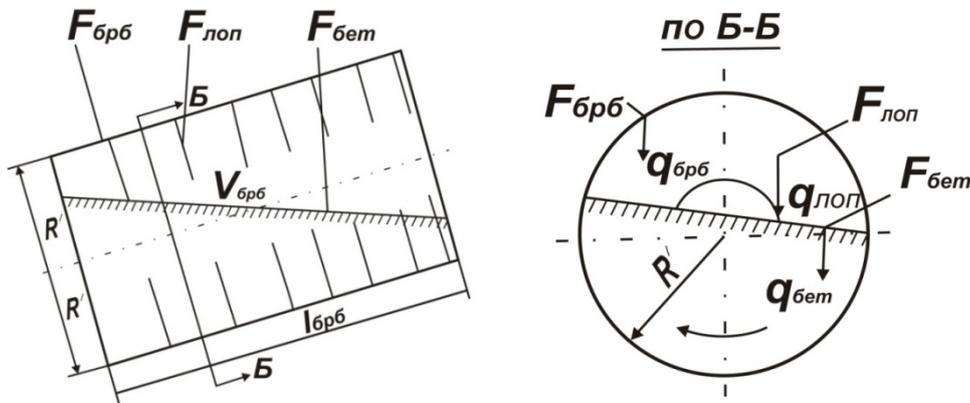


Рис. 5.5. Расчетная схема смесительного барабана АВС

Исходя из геометрических соображений, центральный угол φ (рис. 5.6), опирающийся на хорду AB , представляющую свободную поверхность бетонной смеси, связан с коэффициентом заполнения k_3 следующим соотношением:

$$k_3 = \frac{\varphi}{360} - \frac{\sin \varphi}{2\pi}. \quad (5.43)$$

При определенном теперь значении φ можно найти площади конденсатообразующих поверхностей, отнесенные к 1 п.м длины барабана F' , так что

$$F = F' l_{брб}, \quad (5.44)$$

и, соответственно:

- внутренняя цилиндрическая поверхность барабана над плоскостью бетонной смеси

$$F'_{брб} = 2\pi R' \left(1 - \frac{\varphi}{360}\right) \text{ м}^2/\text{м}; \quad (5.45)$$

- вертикальная поверхность лопастей при количестве лопастей m , приходящаяся на 1 п.м длины барабана над плоскостью бетонной смеси

$$F'_{\text{лоп}} = 1,5\pi m \left(1 - \frac{\varphi}{360}\right) (R')^2, \text{ м}^2/\text{м}; \quad (5.46)$$

- свободная поверхность бетонной смеси, контактирующая с паром,

$$F'_{\text{бет}} = 2R' \sin \frac{\varphi}{2}, \text{ м}^2/\text{м}; \quad (5.47)$$

но, так как при $160^\circ < \varphi < 200^\circ$, что близко к реальному заполнению барабана, $\sin \frac{\varphi}{2} \approx 1$, можно с небольшой погрешностью считать, что

$$F'_{\text{бет}} = 2R', \text{ м}^2/\text{м}. \quad (5.48)$$

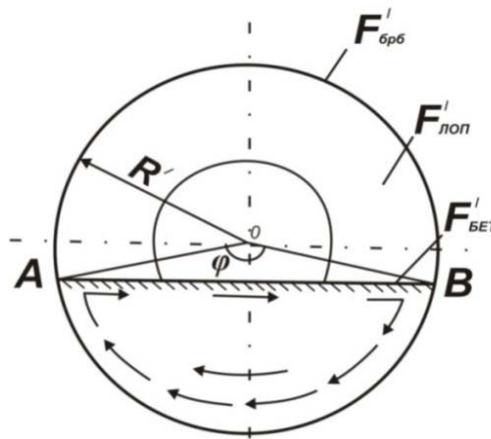


Рис. 5.6. Геометрические параметры барабана ABC

Зависимости $\varphi = f(k_3)$, $F'_{\text{брб}} = f(k_3)$, $F'_{\text{лоп}} = f(k_3)$, $F'_{\text{бет}} = f(k_3)$ представлены на рис. 5.7.

При температурном напоре ΔT , известных площадях конденсации F' и коэффициентах теплопередачи α , в барабане длиной $l_{\text{брб}}$ за время τ выделится в процессе конденсации количество тепла Q :

$$Q = \Delta T l_{\text{брб}} \tau \sum F \alpha = \Delta T l_{\text{брб}} \tau (F'_{\text{брб}} \alpha_{\text{брб}} + F'_{\text{лоп}} \alpha_{\text{лоп}} + F'_{\text{бет}} \alpha_{\text{бет}}). \quad (5.49)$$

Для того чтобы объем бетонной смеси $V_{\text{бет}}$ нагреть на Δt , требуется количество тепла Q :

$$Q = V_{\text{бет}} \Delta t c = \varphi \frac{\pi R'^2}{360} l_{\text{брб}} \Delta t c, \quad (5.50)$$

где c – объемная теплоемкость бетонной смеси, Вт · ч/м³ · °С.

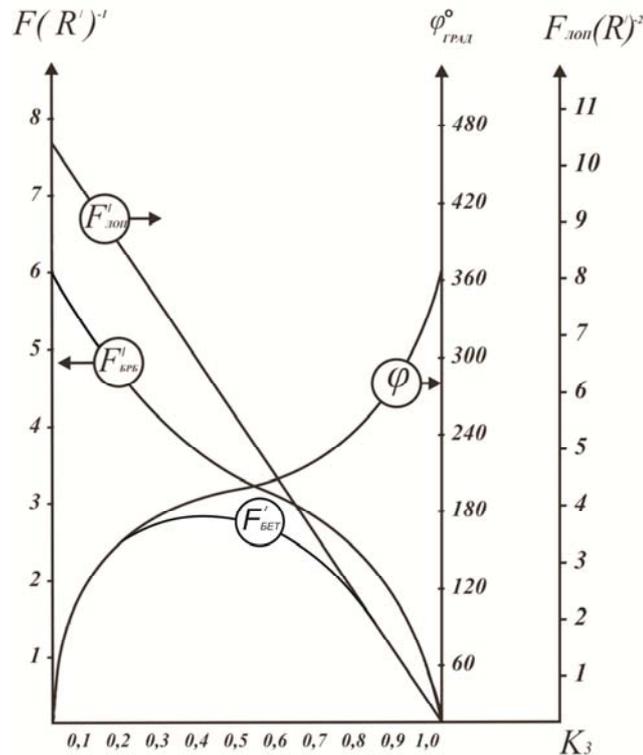


Рис. 5.7. Зависимости площадей конденсатообразующих поверхностей $F'_{брб}$, $F'_{лон}$, $F'_{бет}$ и центрального угла φ от коэффициента заполнения барабана k_3

Подставим значение Q из (5.50) в уравнение (5.49) и решим его относительно φ , воспользовавшись для F' (5.45) – (5.48):

$$\varphi = 360 \frac{\tau \Delta T (2\alpha_{брб} + 1,5R' \alpha_{лон} m + 0,637\alpha_{бет})}{\tau \Delta T (2\alpha_{брб} + 1,5R' \alpha_{лон} m) + R' \Delta t c}, \quad (5.51)$$

где τ – продолжительность разогрева, ч; α – коэффициенты теплопередачи, $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$; m – количество лопастей на 1 п.м длины барабана; Δt – температура, на которую поднимается температура смеси, $^\circ C$.

Найденный угол φ через (5.43) определяет максимальный коэффициент заполнения барабана смесителя k_3 , позволяющий за время τ поднять температуру объема бетонной смеси $V_{бет}$ на Δt $^\circ C$. При большем коэффициенте заполнения (и, соответственно, большем значении φ) площадь конденсатообразующих поверхностей окажется недостаточной для осуществления заданного режима разогрева.

Если в конкретных условиях производства продолжительность разогрева τ не является лимитирующим фактором, то, задавшись технически принятым коэффициентом заполнения (т.е. φ), можно, решая совместно

(5.49) и (5.50), но уже относительно τ , найти минимальную продолжительность разогрева:

$$\tau = \frac{R' \frac{\varphi}{360} \Delta t c}{\Delta T (2\alpha_{брб} + 1,5R' \alpha_{лоп} m + 0,637\alpha_{бет}) - \Delta T \frac{\varphi}{360} (2\alpha_{брб} + 1,5R' \alpha_{лоп} m)}. \quad (5.52)$$

Найденные по (5.51) и (5.52) величины φ и τ – предельные параметры. При заданной продолжительности разогрева τ найденная по (5.51) величина φ определяет максимально допустимый коэффициент заполнения барабана; при заданном коэффициенте заполнения $\varphi = f(k_3)$ найденная по (5.52) величина τ определяет минимальную продолжительность разогрева.

Взаимная зависимость τ и φ позволяет остановиться на каком-то технологически рациональном варианте этих параметров. Чаще всего коэффициент заполнения барабана (коэффициент загрузки) – уже заданная величиной, будучи одной из технических характеристик АБС, поэтому в реальных условиях производства по заданной величине Δ рассчитывается минимальная продолжительность разогрева τ , которая затем корректируется в зависимости от имеющейся мощности источника пара.

Естественное и обязательное условие – непрерывное смешивание в процессе пароразогрева, хотя бы в режиме побуждения, т.к. только в этом случае будут обеспечены постоянное перераспределение тепла по всему объему смеси и постоянный теплоотвод от конденсатообразующих поверхностей. Медленное вращение барабана может привести к перегреву конденсатообразующих поверхностей и, как следствие, к резкому снижению коэффициента теплоотдачи.

При планировании продолжительности разогрева следует иметь в виду, что в результате быстрого подъема температуры и короткого периода собственно разогрева до заданной температуры успеет разогреться лишь растворная составляющая бетонной смеси, зерна же крупного заполнителя (а их на кубометр бетона приходится около 1200 кг) прогреются лишь частично. Вследствие последующего, уже по завершению разогрева, выравнивания температур между растворной частью и заполнителем температура бетонной смеси в целом окажется ниже расчетной. Опыт показывает, что в зависимости от крупности заполнителя достаточной оказывается продолжительность разогрева 15 - 20 мин.

Еще одно важное обстоятельство ни в коем случае не должно быть упущено в ходе пароразогрева – единственного вида разогрева, в процессе которого появляется дополнительная вода – результат конденсации большого количества пара – которая должна быть учтена при расчете количества воды затворения.

§ 5.2. Тепло- и массообменные процессы, происходящие при транспортировании пароразогретой смеси

Потери тепла и влаги бетонной смесью, имеющей заданные технологическим регламентом температуру и влагосодержание, ведут, во-первых, к изменению свойств бетонной смеси и, во-вторых, к нарушению запроектированного температурного режима выдерживания бетонной смеси в конструкциях.

Наиболее высокой интенсивности тепло- и влагопотери достигают при больших температурных перепадах между поверхностью бетонной смеси и средой, а также при высокой скорости обветривания, т.е. в условиях, наиболее характерных для зимнего периода. Еще более возрастают эти потери при транспортировании разогретых бетонных смесей. Величина температурного перепада⁴ здесь может достигать 100 °С, к скорости встречного ветра может добавляться скорость автотранспортного средства, в результате относительная скорость обветривания может достичь 20 - 40 м/с.

Теплопотери бетонной смеси, транспортируемой с побуждением в неутепленных барабанах АБС, имеют тот же порядок, что и при транспортировании в автосамосвалах, проанализированном в гл. 1. В то же время в нормативной литературе [54, 101, 103] отсутствуют какие-либо рекомендации по расчету теплопотерь смеси, транспортируемой в АБС, хотя бы подобные тем, что приводятся для автосамосвалов. Правда, в работе [101] помещен график остывания бетонной смеси в утепленном барабане АБС при температуре воздуха –40 °С, демонстрирующий снижение температуры смеси за три часа транспортирования с 28 до 26 °С. Никаких других сведений, касающихся потерь тепла смесительными барабанами АБС, в том числе и неутепленными, в работе не содержится.

В работе [114] приводится эмпирическая формула для расчета “потерь тепла и снижения температуры бетонной смеси при использовании отечественных АБС С-1036 (СБ-67)”:

$$T_{\sigma.к} = T_{\sigma.н} - 0,00826(36,18 - \tau)(T_{\sigma.н} - T_{н.в}). \quad (5.53)$$

Зависимость величины снижения температуры от аргумента (36,18 - τ) в правой части (5.53) порождает сомнения в корректности этой эмпирической формулы, так как конечная температура бетонной смеси, рассчитанная по (5.53), неуклонно увеличивается с течением времени, что противоречит реальным условиям технологической ситуации.

⁴ Работа выполнялась совместно с д-ром техн. наук Б.М. Красновским.

Рассмотрим характер теплообмена между побуждаемой бетонной смесью, температура которой $T_{б.н}$, и окружающей средой, имеющей постоянную температуру $T_{н.б}$. Теплообмен осуществляется при граничных условиях третьего рода. Понятие температурного поля в постоянно перемешиваемой смеси теряет смысл, так как в процессе вращения барабана происходят непрерывный отвод слоев смеси, контактировавших с поверхностью, и перенос их во внутренние объемы. Речь здесь, таким образом, может идти лишь о поглощении бетонной смесью или об отдаче ею через поверхность некоторого количества тепла, определяемого разницей температур и коэффициентом теплообмена. Поскольку в контакте с охлаждающейся поверхностью находятся постоянно новые слои бетонной смеси, температура которых равна средней температуре всего объема бетонной смеси в данный момент времени, постольку плотность теплового потока q максимальна и соответствует самому начальному периоду теплообмена.

Плотность теплового потока q на поверхности полуограниченного массива a при граничных условиях третьего рода определяется следующей формулой [166]:

$$q = \alpha(T_{б.н} - T_{н.б}) \exp\left(N^2 a \tau\right) \operatorname{erfc} N \sqrt{a \tau}, \text{ Вт/м}^2, \quad (5.54)$$

где $N = \alpha \lambda^{-1}$ – относительный коэффициент теплоотдачи, м^{-1} .

Из (5.54) вытекает целесообразность учета при расчете удельных тепловых потерь $\Delta t'_{mp}$ как интенсивности теплообмена, зависящей от α , так и времени транспортирования, дифференцированного по продолжительности.

Обозначим $K_\tau = \exp\left(N^2 a \tau\right) \operatorname{erfc} N \sqrt{a \tau}$, тогда среднюю плотность теплового потока за интервал времени $0-\tau$ можно записать как

$$q = \alpha \Delta T K_\tau, \text{ Вт/м}^2. \quad (5.55)$$

Количество теплоты Q_m , прошедшее через площадь F за одну минуту составит

$$Q_m = 60^{-1} \alpha \Delta T K_\tau F, \text{ Вт} \cdot \text{ч/мин}. \quad (5.56)$$

Количество теплоты Q_v , требующееся для нагрева (или теряемое при остывании) на 1°C объема бетонной смеси V , составляет

$$Q_v = c \gamma V, \text{ кДж/}^\circ\text{C}, \quad (5.57)$$

где γ – объемная масса. Тогда потеря объемом V бетонной смеси теплоты Q_m ведет к снижению за 1 мин температуры на Δt :

$$\Delta t = Q_m Q_v^{-1} = \alpha K_\tau (60 c \gamma)^{-1} \Delta T F V^{-1}, \text{ }^\circ\text{C/мин}. \quad (5.58)$$

Изменение температуры смеси в течение одной минуты при температурном перепаде в 1°C $\Delta t'_{mp}$ составит

$$\Delta t'_{mp} = \alpha K_{\tau} F (60c\gamma V)^{-1}, \text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}$$

или при $c = 1,05$ кДж/кг и $\gamma = 2400$ кг/м³

$$\Delta t'_{mp} = 24 \cdot 10^{-6} \alpha K_{\tau} F V^{-1}, \text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин.} \quad (5.59)$$

Следует отметить, что если пренебречь ошибкой 5 – 10 %, то для каждого значения α можно принять среднее значение $\Delta t'_{mp}$.

Воспользовавшись (5.54) для значений τ , близких к нулю, получим $K_{\tau} = 1$ и плотность теплового потока q :

$$q = \alpha \Delta T, \text{ Вт/м}^2. \quad (5.60)$$

Удельное изменение температуры бетонной смеси $\Delta t'_{mp}$ в течение одной минуты при температурном перепаде в один градус с учетом (5.59) и $K_{\tau} = 1$ будет

$$\Delta t'_{mp} = 24 \cdot 10^{-6} \alpha F V^{-1}, \text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин} \quad (5.61)$$

В связи с тем, что диаметры барабанов АБС ограничены единичными транспортными габаритами, приведенный радиус барабанов смесителей СБ-69, СБ-92, СБ-127, СБ-130, СБ-159 и т.д. колеблется в пределах $R' = 0,8 - 1,0$ м. Изменение геометрического объема барабана достигается чаще всего изменением его длины при неизменном приведенном радиусе R' , в результате чего модуль поверхности барабана всех АБС практически оказывается одинаковым и равным $FV^{-1} \approx 4,2$ (например, для СБ-92: $F = 15,0$ м², $V = 3,5$ м³, $FV^{-1} = 4,27$ м⁻¹; для СБ-127: $F = 23,4$ м², $V = 5,6$ м³, $FV^{-1} = 4,18$ м⁻¹ и т.п.).

Подставив в (5.61) значение $FV^{-1} \approx 4,2$, получим:

$$\Delta t'_{mp} = 24 \cdot 10^{-6} \alpha \cdot 4,2 \approx \alpha \cdot 10^{-4}, \text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин.} \quad (5.62)$$

Изменение температуры бетонной смеси $\Delta t'_{mp}$, имеющей начальную температуру $T_{\delta.н}$ и транспортируемой в течение τ минут в АБС при температуре наружного воздуха $T_{н.в}$ (так что $\Delta T = T_{\delta.н} - T_{н.в}$) определяется зависимостью:

$$\Delta t_{mp} = \alpha \cdot 10^{-4} \Delta T \tau, \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (5.63)$$

а конечная температура бетонной смеси $T_{\delta.к}$:

$$T_{\delta.к} = T_{\delta.н} - \Delta t_{mp} = T_{\delta.н} - \alpha \cdot 10^{-4} \Delta T \tau, \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (5.64)$$

Выражения (5.63) и (5.64) наглядно демонстрируют зависимость теплопотерь от интенсивности теплообмена, задаваемой коэффициентом теплообмена α , причем величина теплопотерь прямо пропорциональна величине α .

На рис. 5.8 и 5.9 представлены графики изменения температуры бетонной смеси при транспортировании соответственно в смесительном барабане АБС и бетоновом АБН, полученные в реальных условиях при температуре наружного воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывает достаточно высокую сходимость – максимальные отклонения не выходят за пределы $\pm 6\%$. Таким образом, окончательно, для расчетов теплопотерь бетонной смеси, транспортируемой в АБС, величину удельного снижения температуры $\Delta t'_{тр}$ можно определять зависимостями (5.59) и (5.61).

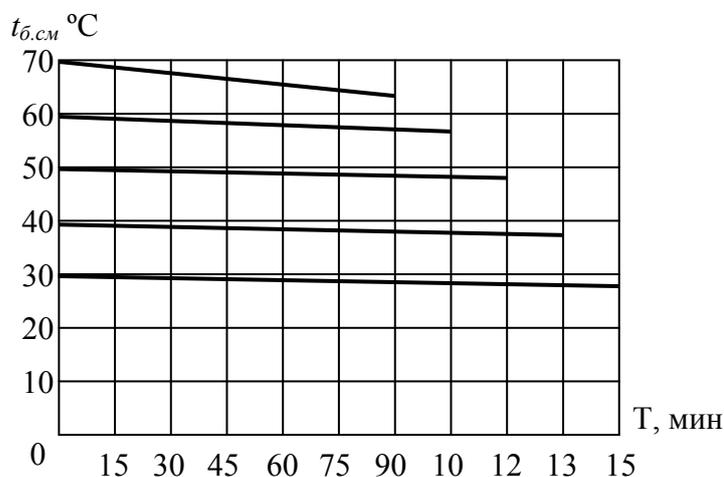


Рис. 5.8. Снижение температуры бетонной смеси при транспортировании в смесительном барабане АБС при температуре наружного воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

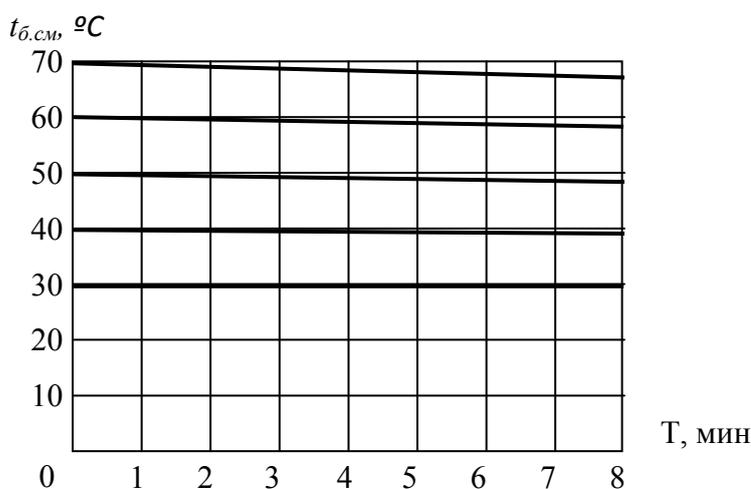


Рис. 5.9. Снижение температуры бетонной смеси в бетоновом АБН при температуре наружного воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рассмотрим процесс испарения влаги из бетонной смеси, транспортируемой в АБС, в зависимости от температуры бетонной смеси и среды, условий обветривания (скорости ветра, скорости движения АБС, частоты вращения барабана смесителя) и продолжительности перевозки.

Примем следующие условия движения АБС, влияющие на интенсивность испарения влаги из бетонной смеси (рис. 5.10, а). АБС, приведенный радиус барабана которого R' , движется со скоростью V_a против встречного ветра, скорость которого V_e . Суммарная скорость воздуха V относительно внешней поверхности барабана смесителя составляет $V = V_a + V_e$. В результате обтекания горловины воздухом и образования некоторой разности между атмосферным давлением и давлением в патрубке, в самом патрубке воздух движется в сторону горловины со скоростью V_n [167]:

$$V_n = V \sqrt{k_z (\eta_n + \eta_z)^{-1}}, \text{ м/с,} \quad (5.65)$$

где k_z – коэффициент обтекания, $k_z \approx 0,4$; η_n и η_z – коэффициенты местных сопротивлений патрубка и на выходе из него (горловине), которые ориентировочно могут быть приняты $\eta_n = 2,5$ и $\eta_z = 1,2$.

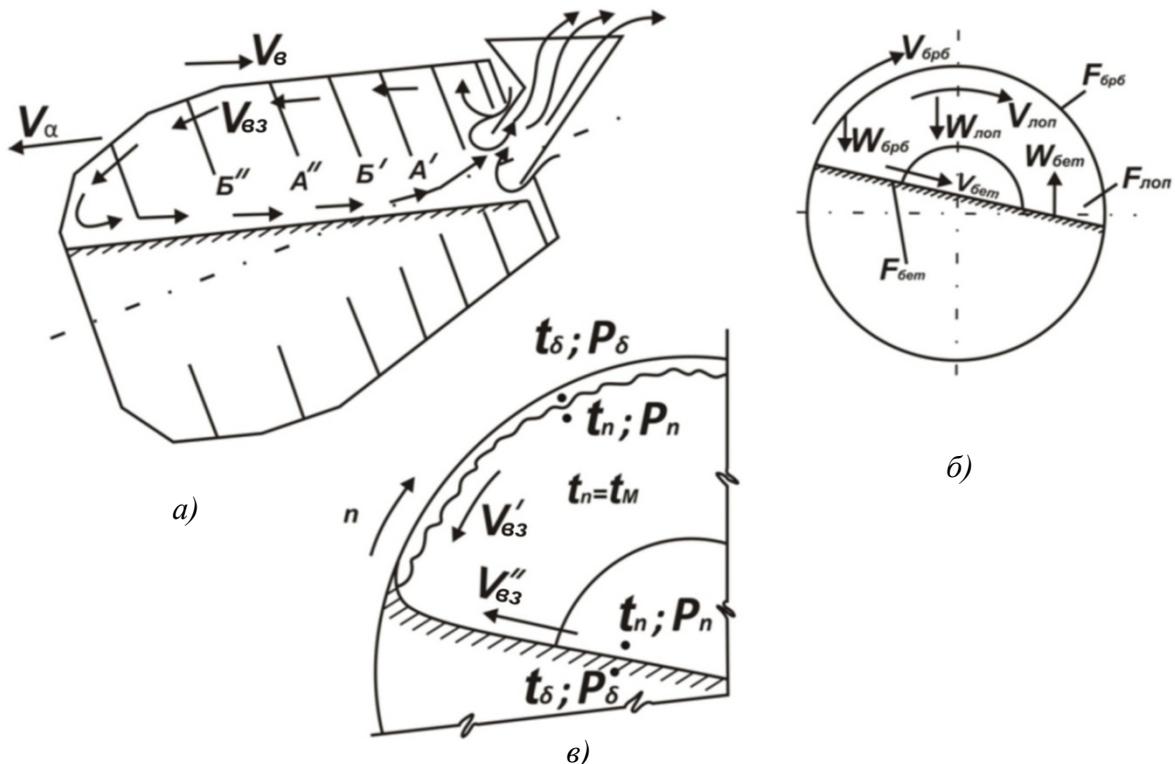


Рис. 5.10. Схемы воздухо- и влагообменных процессов: а – воздухообмена и осевого движения воздуха в автобетоносмесителе; б – испаряющихся поверхностей; в – к расчету удельных влагопотерь

При принятых согласно [167] коэффициентах, скорость воздуха в патрубке загрузочного устройства составит ориентировочно

$$V_n = V \sqrt{0,4(2,5 + 1,2)^{-1}} = 0,33V, \text{ м/с.}$$

При скорости движения АБС 36 км/ч ($V_a = 10$ м/с) и скорости встречного ветра $V_{\text{в}} = 10$ м/с, скорость воздуха в патрубке составит $V_n = 0,33(10 + 10) = 6,6$ м/с.

Объем воздуха, проходящий через патрубок, формируется двумя потоками: потоком воздуха, отсасываемым из внутренней полости барабана смесителя, и потоком воздуха, засасываемым извне через зазоры между патрубком загрузочного устройства и лопастным оперением загрузочного отверстия.

Скорость воздушного потока V_x на расстоянии x от устья патрубка, диаметр которого d_n , определяется зависимостью [168]

$$V_x = \frac{V_n}{16} \left(\frac{d_n}{x} \right)^2. \quad (5.66)$$

Если задаться скоростью потока $V_x = 0,1$ м/с, то при диаметре патрубка $d_n = 0,3$ м расстояние от устья, где будет обеспечено движение воздуха со скоростью V_x , составит

$$x = \frac{d_n}{4} \sqrt{\frac{V_n}{V_x}} = \frac{0,3}{4} \sqrt{\frac{6,6}{0,1}} = 0,61.$$

На большем удалении от устья патрубка скорость потока быстро снижается: так, на расстоянии 1 м от устья $V_x \approx 0,04$ м/с, а на расстоянии 1,5 м $V_x \approx 0,016$ м/с.

Рассмотрим характер движения тех поверхностей, с которых происходит испарение при вращении барабана смесителя (рис. 5.10, б). Такими поверхностями являются собственно поверхность бетонной смеси $F_{\text{бет}}$, внутренняя поверхность барабана смесителя $F_{\text{брб}}$ и поверхности лопастей $F_{\text{лон}}$ над свободной поверхностью бетонной смеси. Поверхности барабана и лопастей непрерывно в процессе вращения смесителя увлажняются и являются такими же активными испаряющими поверхностями, как и свободная поверхность бетонной смеси.

При вращении смесителя с частотой n линейная скорость поверхности барабана смесителя $V_{брб}$ и свободной поверхности бетонной смеси $V_{бет}$ составляют

$$V_{бет} \approx V_{брб} \approx \frac{2\pi R'n}{60}, \text{ м/с.} \quad (5.67)$$

В связи с изменением скользящего радиуса лопастей скорость будет переменной по высоте лопасти, однако для ориентировочных расчетов можно принять $V_{лон} \approx V_{брб} \approx V_{бет}$. Для частоты вращения барабана смесителя в режиме побуждения бетонной смеси средней частотой можно считать 4 - 5 об/мин.

Тогда при $R' = 0,7$ м согласно (5.67)

$$V_{бет} \approx V_{брб} \approx V_{лон} \approx \frac{2\pi 0,7 \cdot 5}{60} = 0,37, \text{ м/с,}$$

что почти на порядок превышает скорость воздушного потока на расстоянии 1 м от устья загрузочной воронки. Таким образом, ролью патрубка загрузочной воронки в создании в полости барабана воздушного потока, обладающего скоростью, сопоставимой со скоростью $V_{бет} \approx V_{лон} \approx V_{брб}$, можно для практических расчетов пренебречь.

В то же время объем воздуха, заключенный между лопастями А'Б' (см. рис. 5.10, а), вследствие вращения барабана перемещается ("проталкивается") в положение А''Б'' со скоростью $V_{вз}$ через один полный оборот барабана.

Лопастное оперение смесителя состоит из двух 3 - 3,5 витковых лопастей и при длине барабана 3,2 м (СБ-92) шаг одного витка составляет примерно 1 м. Перемещаясь из положения А'Б' в положение А''Б'', воздух проходит расстояние 1 м.

При частоте вращения барабана в режиме побуждения $n = 5$ об/мин продвижение воздуха на 1 м совершается за 12 с, т.е. со скоростью $V_{вз} = 0,083$ м/с, что почти в четыре раза меньше $V_{брб} \approx V_{бет} \approx V_{лон}$. Полный оборот от загрузочной воронки до глухого торца барабана и вновь к загрузочной воронке до зоны, где воздух попадает в зону всасывающего влияния патрубка, совершается за $6,4/0,083 \approx 77$ с.

В реальном смесителе свободная поверхность смеси, стенки барабана и лопасти движутся со скоростью $V_{бет}$, $V_{брб}$ и $V_{лон}$ относительно неподвижного, в радиальном направлении, воздуха.

В силу относительности их взаимного перемещения будем считать свободную поверхность бетонной смеси, внутреннюю поверхность бара-

бана и поверхности лопастей неподвижными, но постоянно влажными, а воздух, вернее, паровоздушную среду – движущимся со скоростью

$$V_{нв} = V_{брб} = V_{бет} = V_{лон}.$$

Коэффициенты массообмена при испарении и “вынужденном” движении паровоздушной смеси с достаточной для практических расчетов точностью могут быть определены по формуле А.В. Нестеренко [109]:

$$Nu' = 0,445 Re^{0,61} Yu^{0,135}, \quad (5.68)$$

где $Nu' = \alpha' \sqrt{S} (\lambda')^{-1}$ – диффузионный критерий Нуссельта, здесь α' – коэффициент влагообмена, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{МПа}$; S – приведенная поверхность испарения, м^2 ; λ' – коэффициент теплопроводности, $\text{кг/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{МПа}$; $Re = Vl v^{-1}$ – критерий Рейнольдса, где V – скорость паровоздушной среды относительно поверхности бетона, м/с ; l – определяющий размер, м ; ν – коэффициент кинематической вязкости паровоздушной среды в приповерхностном слое, $\text{м}^2/\text{с}$; $Yu = (T_c - T_m) T_c^{-1}$ – критерий Гухмана, где T_c и T_m – соответственно абсолютные температуры пара в поверхностном слое бетона и паровоздушной среды по мокрому термометру.

Внутренняя поверхность барабана и лопасти смесителя, увлажненные бетонной смесью, проходят паровоздушное пространство над свободной поверхностью бетонной смеси за время $\frac{3,14 R'}{0,37} = \frac{3,14 \cdot 0,7}{0,37} = 6$ с, поэтому можно считать, что температура испаряющей поверхности за это время изменяется незначительно и остается равной температуре разогретой бетонной смеси t_{σ} . Температуру паровоздушной среды в приповерхностных слоях примем $t_n = t_{\sigma} - 10$, и с учетом того, что относительную влажность паровоздушной среды приповерхностного слоя можно считать $\varphi = 100$ %, температуру мокрого термометра примем $t_m = t_n$ (рис. 5.10, в).

Парциальное давление пара в приповерхностном слое бетонной смеси обозначим p_{σ} , парциальное давление водяного пара в приповерхностном слое паровоздушной смеси – p_n . Удельные влагопотери каждой поверхности обозначим соответственно $W_{бет}$, $W_{брб}$ и $W_{лон}$. Если температуру и относительную влажность среды во всем объеме над свободной поверхностью бетонной смеси принять постоянными, то при принятом ранее допущении $V_{лон} = V_{брб} = V_{бет}$ справедливым можно считать и равенство удельных влагопотерь $W_{лон} = W_{брб} = W_{бет}$. Тогда удельные влагопотери (испарение), отнесенные к 1 м^2 поверхности, могут быть определены выражением

$$W = \alpha' (p_{\sigma} - p_n), \quad \text{кг/м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (5.69)$$

где коэффициент влагообмена α' определяется из (5.68).

Результаты производственного эксперимента достаточно хорошо согласуются с расчетными данными удельных влагопотерь.

Эффективная мера, предотвращающая как влагопотери, так и потери тепла за счет испарения, – укрытие горловины загрузочной воронки и всего проема загрузочного узла так, как это показано, например, на рис. 5.11. Практика показала, что укрытие подобного типа почти полностью исключает потери влаги и тепла в результате испарения.



а)



б)



в)



г)

Рис. 5.11. Утепление смесительных барабанов и загрузочно-разгрузочных устройств автобетоносмесителей. Загрузочное устройство АБС: а – открыто; б – закрыто; в – открыто у утепленного смесительного барабана; г – закрытие разгрузочного устройства

§ 5.3. Исследование теплового и термонапряженного состояния бетона из пароразогретой бетонной смеси в конструкции

Изучение теплового и термонапряженного состояния ограждающих конструкций зданий и сооружений, возводимых из монолитного бетона, требует рассмотрения влияния различных факторов на температурный режим твердеющего бетона: начальной температуры укладываемой бетонной смеси, температуры основания, на которое укладывается бетонная смесь; температуры окружающей среды и условий теплообмена бетона с окружающей средой; характеристик бетона как материала и типов возводимых конструкций; мощности применяемой тепловой изоляции и ее теплофизических характеристик и другое [107, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181].

Экспериментальное изучение в условиях строительной площадки влияния всех факторов на твердение бетона практически неосуществимо, требует больших затрат труда, времени и материальных средств, поэтому при выполнении настоящих исследований осуществлялось моделирование процессов твердения бетона при различных условиях с применением ЭВМ⁵ [182, 183, 184]. При проведении исследований были использованы ранее разработанные в ЦНИИСе Минтрансстроя методики, алгоритмы и программы, а также осуществлено их совершенствование и доработка.

Исследование возведения ограждений зданий и сооружений из монолитного бетона с применением предварительно разогретых смесей осуществлялось по имеющейся в ЦНИИСе программе для ЭВМ ZA 110, ранее разработанной в лаборатории теплофизических испытаний и экономии энергоресурсов в стройиндустрии, многократно апробированной и проверенной практикой.

Для решения специфических вопросов возведения ограждающих конструкций из монолитного бетона с использованием пароразогретых в АБС бетонных смесей указанную программу пришлось коренным образом переработать и создать практически новую программу ZA 210, которая на момент начала исследований не имела аналогов в стране.

⁵ Исследования проводились в лаборатории теплофизических испытаний и экономии энергоресурсов в стройиндустрии Всесоюзного научно-исследовательского института транспортного строительства (ЦНИИС) Министерства транспортного строительства СССР, возглавляемой д-ром техн. наук А.Р. Соловьянчиком. Автор участвовал в постановке задач исследований, разработке методики, проведении исследований (Отчет по теме НИР СМ-89 (90)-3-1029, 1989. 86 с.).

Один из важнейших моментов в достижении достоверности расчетов – правильный учет экзотермии цемента [185, 186]. В используемых программах заложены математические модели, разработанные на основании многочисленных экспериментов В.С. Лукьяновым, А.Р. Соловьянчиком и другими исследователями [187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195]. Использование ЭВМ для прогнозирования температурных режимов твердения бетона и роста прочности привело к получению обширной информации, которая для анализа и наглядности была представлена в графическом виде.

Особенность учета процессов теплопереноса при создании программных комплексов ЗА 110 и ЗА 210 – то, что в основу процессов теплопереноса в исследуемой области заложена система уравнений балансов тепловой энергии. Гибкость алгоритма в программе для ЭВМ достигнута за счет применения специального приема, являющегося дальнейшим развитием метода гидравлических аналогий, разработанного ранее в ЦНИИСе В.С. Лукьяновым. Согласно этому методу исследуемая область расчленяется на конечные элементы и в дальнейшем рассматривается их тепловое взаимодействие.

Алгоритм программы составлен таким образом, что тепловое взаимодействие моделируется системой обыкновенных дифференциальных уравнений, причем правые части формируются автоматически от числа элементов и связей между ними, указываемых в исходных данных. Влияние температуры на кинетику гидратации цемента учтено на основании гипотезы приведенного времени.

Уравнение баланса тепла выглядит следующим образом:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3, \quad (5.70)$$

где Q_1 – количество теплоты, которое необходимо сообщить некоторому объему тела, чтобы повысить его температуру на Δt , °С; Q_2 – количество теплоты, протекающей через поверхность рассматриваемого объема за время $d\tau$ вследствие теплопроводности материала и тепловосприятости поверхности; Q_3 – количество теплоты, выделенное вследствие экзотермии цемента.

Для изопараметрических объемов, на которые разбивается область исследования, это уравнение может быть записано в виде

$$\frac{t_1 - t_m}{\rho_{m_1}} d\tau + \dots + \frac{t_n - t_m}{\rho_{m_k}} d\tau + q_m d\tau - c_{t_m} d_{t_m} = 0, \quad (5.71)$$

где t_m – температура m -го изопараметрического объема; $t_1 - t_m$ – температура элементов (объемов), соприкасающихся (связанных) с тем элементом (блоком), для которого записано уравнение; $d\tau$ – элементарный период теплообмена; ρ_{m_k} – термическое сопротивление между соседними соприкасающимися элементами (объемами); q_m – тепловыделение m -го элемента; c_{t_m} – теплоемкость m -го элемента, для которого записывается уравнение.

Вся область исследования предполагается расчлененной на N параметрических элементов. Их взаимодействие между собой описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, аналогичных вышеприведенному, т.е. тепловая модель конструкции превращается в математическую модель

$$c_{t_1} \frac{dt_1}{d\tau} = \sum_{k=1}^{n_1} \frac{t_k^* - t_1^*}{\rho_{1k}} + q_1 \quad (5.72)$$

.....

$$c_{t_N} \frac{dt_N}{d\tau} = \sum_{k=1}^{n_N} \frac{t_k^* - t_N^*}{\rho_{Nk}} + q_n, \quad (5.73)$$

где n_N – количество связей m -го элемента с соседним, включая граничные условия; t_k^*, t_N^* – значения температуры N -го и k -го элементов в предшествующий данному момент времени.

В используемой программе система уравнений типа (5.72, 5.73) интегрируется методом Рунге-Кутты подпрограммой RKGS. Последняя автоматически выбирает шаг интегрирования $d\tau$ в соответствии с заданной верхней границей погрешности ε . Если абсолютная погрешность в ходе расчета получается больше заданной, то шаг делится пополам. Шаг интегрирования удваивается, если точность избыточна. Предельное число уравнений системы равно 500, граничных условий 24. Для вычисления правых частей уравнений системы составлена программа, которая учитывает схему связей между конечными элементами и последних с граничными условиями.

Существует подпрограмма расчета тепловыделения цемента и набора прочности бетона. Математическая модель тепловыделения цемента и набора прочности бетона построена следующим образом. На каждом временном шаге интегрирования по заданной температуре, вычисленной на

предыдущем шаге для элемента M , определяется переходной коэффициент по формуле

$$\alpha_i = \frac{1}{(0,6 + 0,02t)^n}, \quad (5.74)$$

где n – показатель степени, различный для разных цементов и видов тепловой обработки бетона.

С использованием этого коэффициента определяют показатель зрелости бетона τ_{np} в данном конечном элементе, затем величину тепловыделения цемента, температурную поправку для данного элемента и, наконец, его температуру с поправкой. Функция тепловыделения цемента задана в виде зависимости

$$\mathcal{E}_{i_k} = \mathcal{E}_{\max} \left(1 - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_1 \tau_{np}} + \frac{k_1}{k_2 - k_1} e^{-k_2 \tau_{np}} \right), \quad (5.75)$$

где $\mathcal{E}_{\max} = 0,01(207\Pi_{C_3A} + 120\Pi_{C_3S} + 100\Pi_{C_4AF} + 62\Pi_{C_2S})$, (5.76)

здесь процентное содержание в цементе Π_{C_3A} –трехкальциевого алюмината; Π_{C_3S} – трехкальциевого силиката; Π_{C_4AF} – четырехкальциевого алюмоферита; Π_{C_2S} – двухкальциевого силиката.

Показатель зрелости (приведенное время твердения) бетона в k -м изопараметрическом элементе определяется по формуле

$$\tau_{np.k} = \sum \frac{\Delta \tau_{ik}}{\alpha_i}, \quad (5.77)$$

где $\Delta \tau_{ik}$ – продолжительность i -го временного интервала, которая выбирается исходя из допустимой погрешности.

Получаемая на i -м шаге приведенная температура от тепловыделения цемента определяется по формуле

$$t_{np.i,k} = \frac{C \mathcal{E}_{i_k}}{c_{об}}, \quad (5.78)$$

где C - расход цемента, кг/м³; $c_{об}$ – объемная теплоемкость бетона, ккал/м³ · °С.

Температурное приращение на i -м шаге составит

$$\Delta t_{np.i,k} = (t_{np.i,k} - t_{np.i-1,k}). \quad (5.79)$$

Температура бетона на $i+1$ шаге k -го изопараметрического элемента вычисляется по формуле

$$t_{i+1} = \Delta t_{np.i,k} + t_{i,k}. \quad (5.80)$$

При исследовании термонапряженного состояния железобетонных конструкций возможно применение метода конечных элементов и гипотезы плоских сечений, который при решении аналогичных задач нашел применение в МИИТе [196]. В ЦНИИСе же выбран более простой (при переходе от одной расчетной схемы к другой), оперативный и дешевый по затратам машинного времени метод, основанный на гипотезе плоских сечений [197].

Основные допущения этого метода сводятся к следующему:

- напряженное состояние всех точек конструкции является одноосным (напряжения действуют вдоль ее оси, стремясь вызвать появление поперечных трещин);
- полученные с помощью расчета напряжения хотя и могут превосходить предел трещинообразования, но расчетная схема при этом считается неизменной, а сами напряжения остаются упругими;
- краевой эффект на торцах игнорируется.

Если торцы элемента свободны, материал обладает упругими свойствами, не изменяющимися по сечению. В начальный момент, когда температура во всех точках сечения одинакова, напряжения отсутствуют. В любой последующий момент, когда температура изменяется на какую-то величину, в конструкции появятся температурные напряжения.

Для определения температурных напряжений в бруске любого сечения Н.Н. Малининым и И.А. Биргером предложена следующая формула:

$$\sigma_i = E_i \left(\frac{N}{A} + \frac{M_y^{III}}{J_y^{III}} x_i^{III} + \frac{M_x^{III}}{J_x^{III}} y_i^{III} - \alpha_i t_i \right), \quad (5.81)$$

где верхним индексом помечены моменты относительно приведенных главных осей $o^{III} - x^{III}$ и $o^{III} - y^{III}$.

Если заменить интегралы суммами (что необходимо при переходе от сплошного сечения к сечению, расчлененному на элементарные блоки), выражения величин, входящих в формулу (5.81), примут следующие формы:

$$\text{– температурная сила} \quad N = \sum_{i=1}^n E_i \alpha_i f_i; \quad (5.82)$$

$$\text{– температурная жесткость сечения} \quad A = \sum_{i=1}^n E_i f_i; \quad (5.83)$$

– термоупругий изгибающий момент относительно оси y^{III}

$$M_y^{III} = \sum_{i=1}^n E_i \alpha_i t_i x_i^{III} f_i; \quad (5.84)$$

– термоупругий изгибающий момент относительно оси x'''

$$M_x''' = \sum_{i=1}^n E_i \alpha_i t_i y_i''' f_i; \quad (5.85)$$

В (5.82) – (5.85) E_i – модуль упругости материала в блоке в рассматриваемый момент времени; α_i – коэффициент температурного расширения материала в i -м элементарном блоке; t_i – средняя температура элементарного блока с номером i ; J_y''', J_x''' – главные осевые моменты инерции термоупругой жесткости.

Положение приведенных главных осей $o''' - x'''$ и $o''' - y'''$ определяются углом поворота β , который находится из выражения

$$\operatorname{tg} 2\beta = \frac{2J_{xy}''}{J_y'' - J_x''}, \quad (5.86)$$

где центробежный момент термоупругой жесткости относительно центральных осей $o'' - x''$ и $o'' - y''$

$$J_{xy}'' = \sum_{i=1}^n E_i x_i'' y_i'' f_i, \quad (5.87)$$

где J_x'', J_y'' – главные осевые моменты инерции термоупругой жесткости относительно центральных осей $o'' - x''$ и $o'' - y''$.

Значения J_x'' и J_y'' определяются по следующим формулам:

$$J_x'' = \sum_{i=1}^n \left(f_i y_i''^2 E_i + \frac{l_i h_i^3}{12} E_i \right), \quad (5.88)$$

$$J_y'' = \sum_{i=1}^n \left(f_i x_i''^2 E_i + \frac{h_i l_i^3}{12} E_i \right), \quad (5.89)$$

где y_i'', x_i'' – координаты центра тяжести i -го элементарного блока в центральной системе ($o'' - x'', o'' - y''$) с началом координат в центре тяжести сечения; l_i – размер элементарного блока в направлении оси ординат; h_i – размер элементарного блока в направлении, параллельном оси абсцисс.

Положение центральных осей определяется в произвольно выбранной системе координат $o^I - x^I$ и $o^I - y^I$ отрезками a и b по следующим формулам:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n E_i x_i^l f_i}{\sum_{i=1}^n E_i f_i}, \quad (5.90)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n E_i y_i^l f_i}{\sum_{i=1}^n E_i f_i}. \quad (5.91)$$

Модель строится следующим образом: сечение мысленно разбивают на элементарные блоки – прямоугольники, прямоугольные треугольники, круги или эллипсы. Каждый из них должен быть задан координатами центра тяжести в системе координат $o^l - x^l$ и $o^l - y^l$ и размерами h_i, l_i . Для прямоугольников – это его стороны, для треугольников – катеты, кругов и эллипсов – диаметры. Для отверстий один из размеров (h_i или l_i) должен быть отрицательным. Заданные координаты центров тяжести элементарных блоков автоматически пересчитываются в центральной системе ($o^{II} - x^{II}, o^{II} - y^{II}$) с учетом переноса осей в центр тяжести сечения, а затем в главной центральной ($o^{III} - x^{III}, o^{III} - y^{III}$) уже с учетом поворота осей и центра тяжести на угол β . Последний пересчет выполняется по формулам

$$y_i^{III} = y_i^{II} \cos \beta - x_i^{II} \sin \beta, \quad (5.92)$$

$$x_i^{III} = y_i^{II} \sin \beta + x_i^{II} \cos \beta. \quad (5.93)$$

Главные осевые моменты инерции термоупругой жесткости в третьей системе координат определяются по формулам

$$J_x^{III} = J_x^{II} \cos^2 \beta - J_y^{II} \sin^2 \beta - J_{xy}^{II} \sin 2\beta, \quad (5.94)$$

$$J_y^{III} = J_x^{II} \sin^2 \beta + J_y^{II} \cos^2 \beta + J_{xy}^{II} \sin 2\beta. \quad (5.95)$$

Если модель построена верно, то должна выполняться проверка:

$$\sum_{i=1}^n (\oplus \sigma_i f_i) + \sum_{i=1}^n (\ominus \sigma_i f_i) = 0, \quad (5.96)$$

где $\oplus \sigma$ и $\ominus \sigma$ – соответственно напряжения со знаком + и знаком –.

Методика подготовки к решению задачи состоит в следующем.

Подлежащую исследованию область расчленяют на конечные элементы, причем более мелкие располагают у границ и в местах, где ожидается более резкое изменение температур. При разбивке на конечные

элементы следует соблюдать два условия, гарантирующие устойчивость решения:

$$1) \frac{c_{tm \min} \cdot \rho_{\min}}{c_{tm \max} \cdot \rho_{\max}} \geq 0,0001; \quad 2) \frac{c_{tm \min} \cdot \rho_{\min}}{c_{tm \max} \cdot \rho_{\max}} \geq 0,01. \quad (5.97)$$

Затем рассчитывают теплоемкости элементов по формуле

$$c_{tm} = c_{y\delta} \gamma V, \quad (5.98)$$

где $c_{y\delta}$ – удельная теплоемкость материала или грунта блока; γ – плотность материала, грунта; V – объем блока.

Термические сопротивления рассчитывают по следующим формулам:

$$\text{– для внутренних элементов} \quad \rho_{mk} = \frac{l_m}{\lambda_m F} + \frac{l_k}{\lambda_k F}, \quad (5.99)$$

$$\text{– для пограничных элементов} \quad \rho'_{mk} = \frac{1}{\alpha_k F_k} + \frac{l_m}{\lambda_m F}, \quad (5.100)$$

где l_m, l_k – расстояния от центра соответствующего элемента до поверхности контакта элементов m и k ; λ_m, λ_k – коэффициенты теплопроводности материалов, соответственно, в элементах m и k ; F – площадь контакта между элементами или со средой; α_k – коэффициент теплоотдачи с поверхности в среду.

Граничные условия (изменение температуры среды) задаются таблицей. При этом они могут быть заданы прямой, ломаной, ступенчатой и кривой линиями. Начальные условия для всех блоков также задаются таблицей. В такой же форме задается и схема связей между конечными элементами, причем информация задается порциями, в которых на первом месте стоит номер элемента, на втором – его теплоемкость, третьем – число связей с соседними или граничными элементами; далее парами – номер – термическое сопротивление на контакте с этим номером.

Перечисленные исходные данные вводятся в компьютер и осуществляется прогон задачи на ЭВМ.

Программа работает следующим образом. По заданному начальному времени, начальному значению температур, шагу введения поправок и шагу интегрирования происходит обращение к подпрограмме ZA011 для решения системы дифференциальных уравнений. Из нее происходит вызов подпрограммы RKGS интегрирования системы методом Рунге-Кутты. Последняя вызывает подпрограмму ZA012 для вычисления правых частей системы и подпрограмму ZA016 выхода. После выхода RKGS определяет-

ся поправка на экзотермию $\Delta t_{np,i}$, затем эта поправка добавляется к результату, полученному подпрограммой RKGS, и она начинает работать на следующем шаге с новыми начальными значениями. При этом подпрограмма RKGS выбирает свой шаг интегрирования, либо делая заданный шаг пополам, если заданная точность не удовлетворяется, либо удваивая его, если точность избыточна. После выхода из RKGS производится приращение начального и конечного времени на заданный шаг, вносится поправка в результат по экзотермии и цикл повторяется до тех пор, пока конечное время не станет больше времени очередной выдачи результатов, после которой вычисления продолжают, начиная с того времени, на котором произошло прерывание.

Поскольку применение технологии бетонирования монолитных конструкций пароразогретыми в АБС смесями потребовало коренных изменений в основной программе ZA110 для учета всех параметров выдерживания пароразогретой бетонной смеси в конструкциях и обеспечения суточного оборота опалубки, то была создана ее новая версия – ZA210.

Усовершенствованная программа ZA210 предназначена для расчета теплового и термонапряженного состояний бетонных и железобетонных конструкций с изменением расчетной схемы непосредственно в процессе расчета: послойное бетонирование, укладка свежееуложенной бетонной смеси на затвердевший ранее бетон, снятие и добавление тепловой изоляции, послойное чередование укладываемого бетона с материалами, не обладающими экзотермическими свойствами, и т.п. Кроме того, предусмотрена возможность учета источников тепла, отличных от экзотермии цемента, в частности использование уложенной в конструкцию пароразогретой бетонной смеси и дообогрев критических зон твердения бетона с помощью термоактивной опалубки.

Для описания алгоритма использовались аналогии из программы ZA110, нумерация ключей оставлена без изменений. В отличие от ZA110 общее число взаимодействующих блоков может достигать 1000, а массив BV – трехмерный. Номера граничных условий, как и раньше в ZA110, – трехзначные, номера блоков – четырехзначные. При этом первая цифра номера всегда является номером слоя, максимальное число слоев – 9. Максимальное число блоков в одном слое – 999, если он всего один, либо 111, если их – максимальное число, т.е. 9 слоев. На рис. 5.12 представлена расчетная схема фрагмента тонкостенной конструкции, а на рис. 5.13 – схема ее наращивания. Результаты расчета выдаются при моделировании выдерживания бетона в конструкции 4, 8, 16, 20, 24 ч.

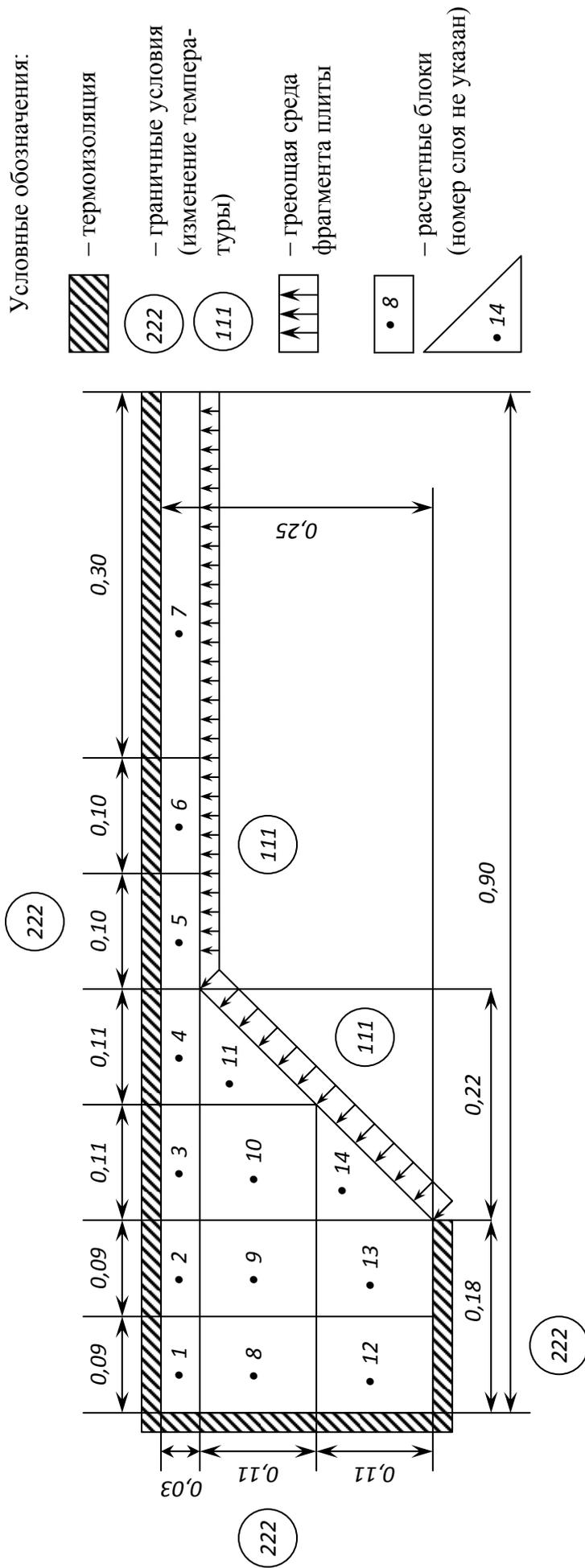


Рис. 5.12. Расчетная схема фрагмента тонкослойной конструкции

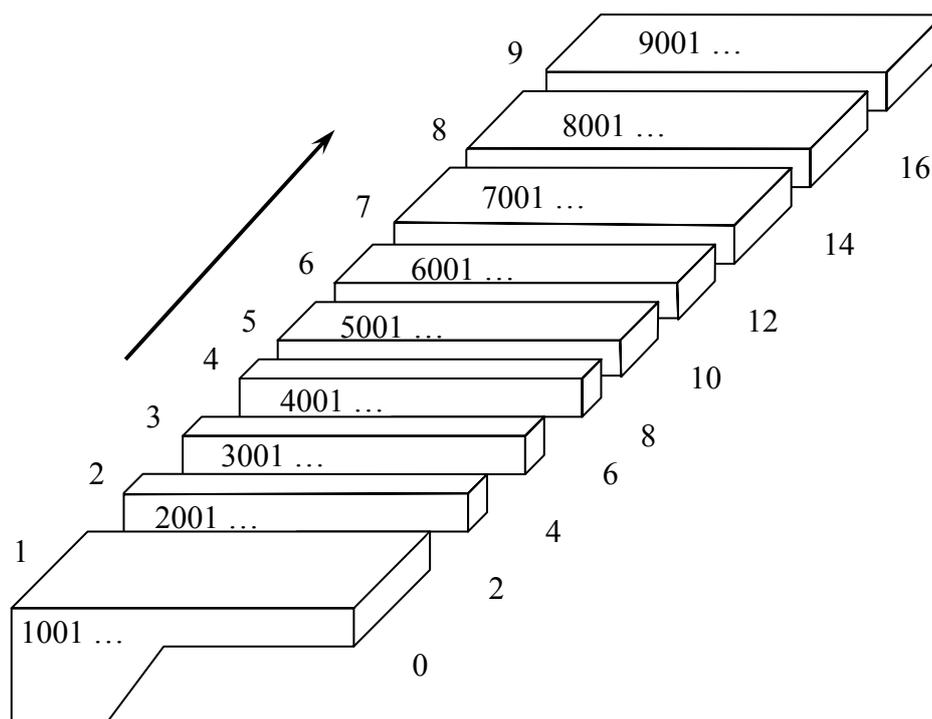


Рис. 5.13. Схема наращивания тонкостенной конструкции

Один из основных критериев, которым должна удовлетворять технология производства работ, – это универсальность возведения различных конструкций и круглогодичность ее использования с учетом разнообразных климатических условий нашей страны, в том числе и при отрицательной температуре наружного воздуха.

Другой основной критерий – уменьшение времени оборачиваемости опалубки, что в конечном итоге сокращает себестоимость возведения конструкций, зданий и сооружений.

Сокращение сроков оборачиваемости опалубки может быть достигнуто лишь при условии ускорения твердения бетона. Следовательно, также основной критерий – набор бетоном регламентируемой для данного типа конструкции распалубочной прочности, которая не может быть ниже критической прочности бетона.

Наиболее сложный вариант – набор бетоном критической прочности до замораживания при отрицательной температуре наружного воздуха. Наиболее сложными для возведения являются тонкостенные конструкции, наиболее технологически оптимальным – суточный оборот опалубки.

Цель настоящего исследования – определение границ применения паропрогретой бетонной смеси при условии обеспечения суточной оборачиваемости опалубки при возведении тонкостенных конструкций при ми-

нимуме требуемой температуры разогрева бетонной смеси в зависимости от конкретных условий.

Исследования были приведены применительно к условиям круглогодичного ведения работ из монолитного бетона при строительстве зданий и сооружений в г. Набережные Челны.

Исследовались температурные режимы во внутренних ограждающих конструкциях зданий, возводимых из монолитного тяжелого бетона при укладке предварительно разогретых бетонных смесей и последующем термосном выдерживании, была рассмотрена расчетная схема в виде фрагмента, представленного на рис. 5.14.

Толщина тонкостенных конструкций – стен и перекрытий – принималась равной 16 см. Было принято, что бетонная смесь укладывается в металлическую опалубку, теплоизолированную с двух сторон слоем пенополиуретана толщиной 3 см и листами асбошифера толщиной 1 см. Старый, ранее уложенный бетон, принимался с температурой, равной температуре окружающего наружного воздуха. Считалось, что тепловая изоляция защищает только вновь уложенную бетонную смесь.

При проведении расчетов было принято, что объемная масса бетона 2500 кг/м^3 , расход цемента 350 кг/м^3 , минералогический состав цемента: $C_3S - 55$, $C_2S - 23$, $C_3A - 8$, $C_4AF - 14 \%$. Коэффициент теплопроводности твердеющего бетона принят равным $\lambda_{m,\delta} = 2,0 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$, затвердевшего бетона $\lambda_{c,\delta} = 1,7 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$. Коэффициент теплообмена конструкций с окружающей средой принимался равным $\alpha = 10 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$.

При проведении исследований было принято, что пароразогретая в АБС бетонная смесь укладывается в конструкцию в максимально сжатые сроки и сразу после укладки имеет начальную температуру 30, 40, 50, 60 °C. Были выполнены варианты расчетов, приведенные в табл. 5.1. Продолжительность расчетного периода составляла 96 ч.

Выполненная серия расчетов позволила получить данные о распределении температур в твердеющем и затвердевшем бетоне и о кинетике роста прочности твердеющего бетона в различных точках конструкций. Результаты исследований позволили сделать выводы, необходимые для разработки предложений по бетонированию пароразогретыми смесями внутренних ограждающих конструкций зданий и сооружений из тяжелого бетона в практических условиях.

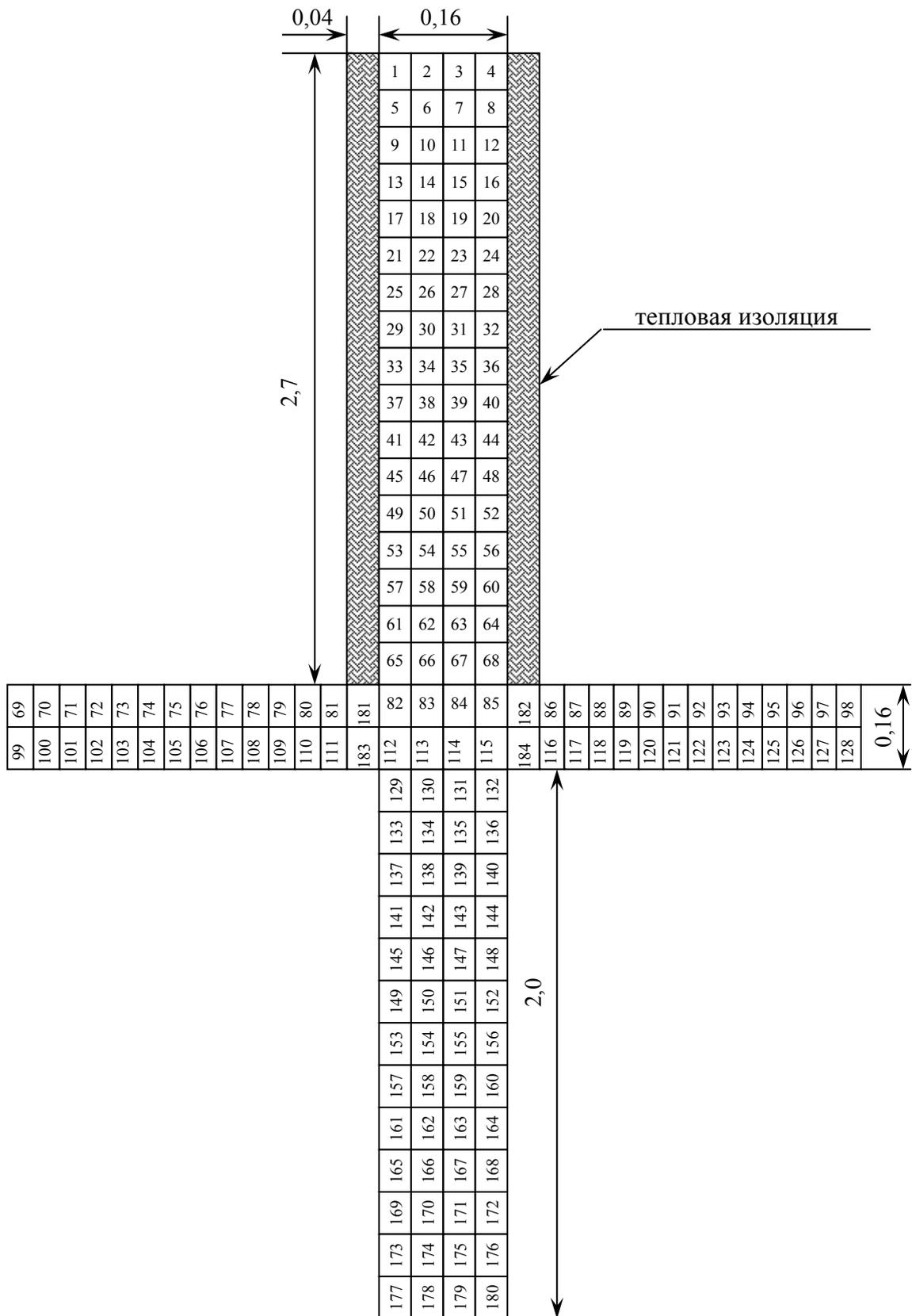


Рис. 5.14. Расчетная схема фрагмента тонкостенной конструкции

Таблица 5.1

Варианты расчетов на ЭВМ при бетонировании пароразогретыми смесями

| Номер варианта | Температура, °С | | |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------|
| | начальная старого бетона | начальная уложенного бетона | наружного воздуха |
| 1(301) | 0 | 30 | 0 |
| 2(302) | - 5 | 30 | - 5 |
| 3(303) | - 10 | 30 | - 10 |
| 4(304) | - 15 | 30 | - 15 |
| 5(305) | - 20 | 30 | - 20 |
| 6(306) | 5 | 30 | 5 |
| 7(307) | 10 | 30 | 10 |
| 8(308) | 15 | 30 | 15 |
| 9(309) | 20 | 30 | 20 |
| 11(311) | 0 | 40 | 0 |
| 12(312) | - 5 | 40 | - 5 |
| 13(313) | - 10 | 40 | - 10 |
| 14(314) | - 15 | 40 | - 15 |
| 15(315) | - 20 | 40 | - 20 |
| 16(316) | 5 | 40 | 5 |
| 17(317) | 10 | 40 | 10 |
| 18(318) | 15 | 40 | 15 |
| 19(319) | 20 | 40 | 20 |
| 21(321) | 0 | 50 | 0 |
| 22(322) | - 5 | 50 | - 5 |
| 23(323) | - 10 | 50 | - 10 |
| 24(324) | - 15 | 50 | - 15 |
| 25(325) | - 20 | 50 | - 20 |
| 26(326) | 5 | 50 | 5 |
| 27(327) | 10 | 50 | 10 |
| 28(328) | 15 | 50 | 15 |
| 29(329) | 20 | 50 | 20 |
| 31(331) | 0 | 60 | 0 |
| 32(332) | - 5 | 60 | - 5 |
| 33(333) | - 10 | 60 | - 10 |
| 34(334) | - 15 | 60 | - 15 |
| 35(335) | - 20 | 60 | - 20 |
| 36(336) | 5 | 60 | 5 |
| 37(337) | 10 | 60 | 10 |
| 38(338) | 15 | 60 | 15 |
| 39(339) | 20 | 60 | 20 |

В летний период времени наблюдаются наиболее благоприятные условия для возведения зданий из монолитного бетона. Вместе с тем целесообразно изучить особенности распределения температур в конструкциях и набора прочности твердеющим бетоном в таких условиях, установить сроки выдерживания бетона, необходимые для набора заданной (проектной) распалубочной прочности.

При укладке бетонной смеси с начальной температурой $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 5.15) блоки 41 и 42, удаленные от старого бетона, за счет экзотермии цемента через 30 ч после укладки разогреваются до температуры $68 - 69\text{ }^{\circ}\text{C}$, потом медленно остывают. Через 96 ч после укладки их температура достигает $32\text{ }^{\circ}\text{C}$. Блок 65, находящийся в контакте со старым бетоном, за счет экзотермии цемента разогревается лишь до температуры $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, потом медленно остывает.

Температура его через 96 ч после укладки составляет $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для распределения температур характерно наличие больших перепадов температур по поверхности конструкции, величина которых через 30 ч после укладки достигает $32 - 33\text{ }^{\circ}\text{C}$, что создает условия для формирования неблагоприятного собственного термонапряженного состояния в этой ограждающей конструкции.

Вариант № 309

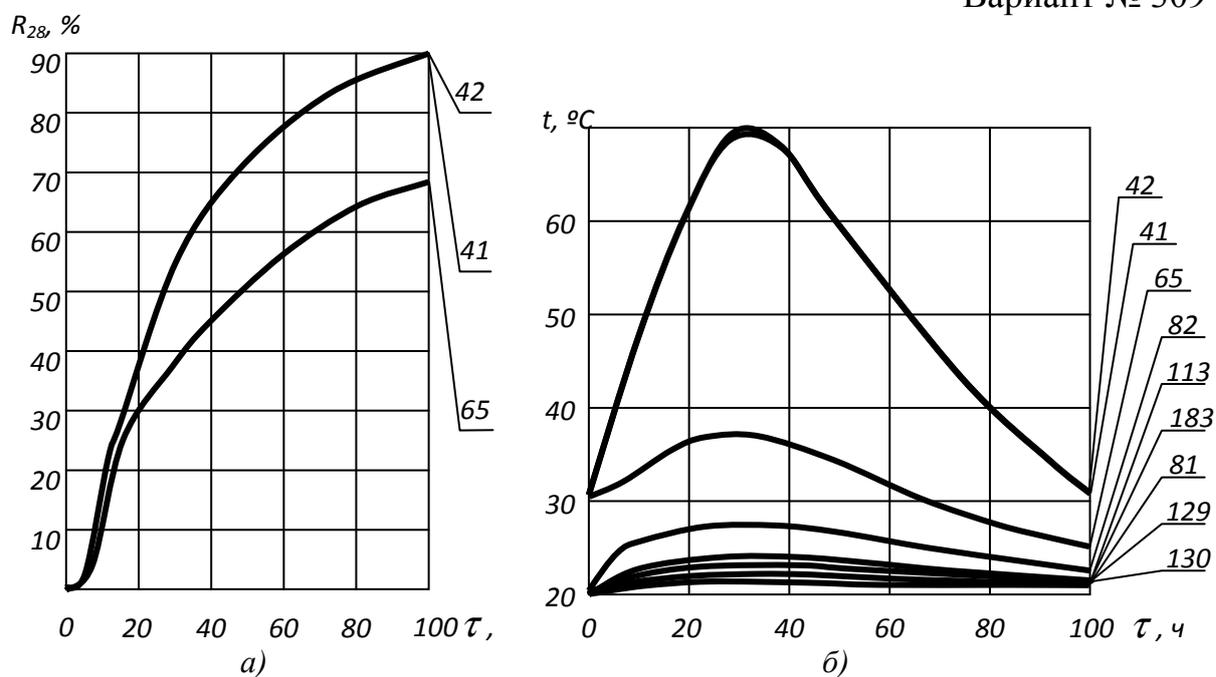


Рис. 5.15. Кинетика роста прочности (а) и изменения температуры (б) бетона при укладке бетонной смеси с начальной температурой $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Собственное термонапряженное состояние формируется в момент достижения бетоном прочности $0,26 - 0,3$ от R_{28} в зонах с наибольшим отставанием процесса гидратации.

Под собственным термонапряженным состоянием понимается наличие температурных напряжений в бетоне при равномерном распределении температуры по объему конструкции, которое в этот момент времени называется температурным полем нулевых напряжений.

Из-за неравномерного распределения температур по объему тонкостенных конструкций наблюдается и неравномерное нарастание прочности бетона в различных точках.

В зонах конструкции, удаленных от старого бетона (блоки 41, 42), бетон интенсивно набирает прочность, через 28 ч после его укладки достигается $50\% R_{28}$, а через 46 ч – $70\% R_{28}$. В то же время в блоке 65 через сутки после укладки прочность составляет всего $32\% R_{28}$, $50\% R_{28}$ достигается через двое суток, а $70\% R_{28}$ только через 96 ч после укладки.

Таким образом, при температуре окружающей среды $+20\text{ }^\circ\text{C}$, начальной температуре уложенной бетонной смеси $+30\text{ }^\circ\text{C}$ и температуре основания $+20\text{ }^\circ\text{C}$ не создаются условия для суточной оборачиваемости опалубки.

Используя графики кинетики роста прочности и изменения температуры бетона при укладке бетонной смеси с начальной температурой $+40$, $+50$, $+60\text{ }^\circ\text{C}$, аналогичные представленным на рис. 5.15, произведем анализ влияния температурного режима укладки пароразогретой бетонной смеси на прочность твердеющего бетона.

При укладке бетонной смеси с начальной температурой $+40\text{ }^\circ\text{C}$ блоки 41, 42 разогреваются через 24 – 25 ч после укладки до температуры $67 - 68\text{ }^\circ\text{C}$, а затем медленно остывают до температуры $28 - 29\text{ }^\circ\text{C}$. Блок 65, находящийся в контакте с основанием, имеющим температуру $+20\text{ }^\circ\text{C}$, вначале остывает до температуры $+37\text{ }^\circ\text{C}$, а затем незначительно разогревается и через 20 ч после укладки опять медленно остывает до температуры $23 - 24\text{ }^\circ\text{C}$. Перепады температур по поверхности ограждения достигают $26 - 28\text{ }^\circ\text{C}$, что создает условия для формирования собственного термонапряженного состояния.

Через сутки после укладки бетон в блоках 41, 42 набирает прочность $54 - 55\% R_{28}$, а в блоке 65 – $38 - 39\% R_{28}$. В блоках 41, 42 бетон достигает прочности $70\% R_{28}$ через 34 ч после укладки, а в блоке 65 эта же прочность достигается через 90 ч после укладки. Таким образом, в рассматри-

ваемых условиях даже при температуре укладываемой бетонной смеси +40 °С не обеспечивается суточная оборачиваемость опалубки при величине распалубочной прочности 50 % R_{28} . Вместе с тем такая прочность может быть достигнута при подогреве основания до температуры укладываемой бетонной смеси.

При начальной температуре уложенной бетонной смеси +50 °С блоки 41, 42 за счет экзотермии цемента разогреваются до температуры +78 °С. Блок 65, находящийся в контакте со старым бетоном, имеющим температуру +20 °С, начинает остывать сразу же после укладки бетона. Перепады температуры по объему тонкостенной конструкции превышают +30 °С, что создает предпосылки для формирования неблагоприятного собственного термонапряженного состояния в конструкции и последующего трещинообразования. Прочность бетона в блоках 41, 42 через сутки после укладки достигает 70 % R_{28} , а в блоке 65 – 45 % R_{28} . Через двое суток после укладки бетона его прочность достигает соответственно 86 % R_{28} и 60 % R_{28} .

При начальной температуре уложенной бетонной смеси +60 °С блоки 41, 42 разогреваются до температуры +86 °С, а блок 65 остывает сразу после укладки бетонной смеси. Перепады температур бетона в объеме конструкции достигают 28 – 30 °С, что создает предпосылки для формирования неблагоприятного собственного термонапряженного состояния и последующего трещинообразования. Через сутки после укладки прочность бетона в блоках 41, 42 достигает 78 % R_{28} , а в блоке 65 – 50 % R_{28} , что обеспечивает суточную оборачиваемость опалубки.

Таким образом, при температуре окружающей среды +20 °С и применении пароразогретых бетонных смесей односуточная оборачиваемость опалубки может быть обеспечена при распалубочной прочности 50 % R_{28} и начальной температуре уложенного бетона +40 °С при условии подогрева основания для укладки бетона до температуры разогрева бетонной смеси, а при распалубочной прочности 70 % R_{28} – при начальной температуре уложенной бетонной смеси не ниже +50 °С и соответственно подогретого основания, на которое укладывается бетонная смесь. Подогрев основания к тому же обеспечит формирование более благоприятного собственного термонапряженного состояния в конструкциях и снизит опасность трещинообразования в них.

Анализ результатов выполненных расчетов по исследованию температурного режима и прочности твердеющего бетона, укладываемого при

температуре наружного воздуха +10 °С, производился с использованием графиков кинетики роста прочности и изменения температуры бетона при укладке бетонной смеси с начальной температурой +30, +40, +50, +60 °С, аналогичных представленным на рис. 5.15.

По итогам анализа можно сделать вывод, что при температуре окружающей среды +10 °С и подогреве основания бетон может за сутки набрать прочность 50 % R_{28} и обеспечить суточную оборачиваемость опалубки. При требуемой распалубочной прочности 70 % R_{28} и суточной оборачиваемости опалубки бетон необходимо укладывать с температурой не ниже +60 °С, обеспечивая при этом подогрев основания.

Аналогично предыдущим была выполнена серия расчетов (варианты 301, 311, 321, 331) по исследованию температурного режима и прочности твердеющего бетона, когда температура наружного воздуха составляла 0 °С.

Анализ показал, что при температуре окружающей среды 0 °С и начальной температуре укладываемой бетонной смеси +30 °С нельзя обеспечить односуточную оборачиваемость опалубки. При прогреве основания в данных условиях можно обеспечить оборачиваемость опалубки один раз в двое суток. Суточная оборачиваемость опалубки при температуре пароразогретой бетонной смеси +40 °С не может быть обеспечена даже при подогреве основания. При начальной температуре уложенной бетонной смеси +50 °С и подогреве основания до такой же температуры можно обеспечить суточную оборачиваемость опалубки. При начальной температуре уложенной бетонной смеси +60 °С и прогреве основания можно обеспечить суточную оборачиваемость опалубки при распалубочных прочностях 50 % R_{28} и 70 % R_{28} .

При температуре наружного воздуха –10 °С бетон остывает в худших условиях, чем это наблюдалось в предыдущих вариантах расчета. Бетон, имеющий начальную температуру +30 °С, не рекомендуется укладывать. При начальной температуре уложенной бетонной смеси +40 °С не обеспечивается суточная оборачиваемость опалубки. Вместе с тем при подогреве основания, увеличении площади тепловой изоляции затвердевшего бетона можно обеспечить оборачиваемость опалубки один раз в двое суток. При начальной температуре твердеющего бетона +50 °С в случае предупреждения остывания бетона в контактной зоне (блок 65) можно обеспечить суточную оборачиваемость опалубки при распалубочной прочности 50 % R_{28} и один раз в двое суток при распалубочной прочности 70 % R_{28} . При на-

чальной температуре уложенного бетона $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно обеспечить оборачиваемость опалубки один раз в сутки при распалубочной прочности $50\% R_{28}$. При этом необходимо принять меры по предупреждению остывания свежего бетона на контакте со старым, затвердевшим бетоном.

Исследование температурного режима и прочности твердеющего бетона, укладываемого при температуре наружного воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, свидетельствует о том, что бетонирование маломассивных тонкостенных конструкций без принятия специальных мер встречает значительные трудности. Анализ результатов расчетов показывает, что при начальной температуре бетонной смеси, уложенной в теплоизолированную опалубку, равной $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, экзотермический эффект реакции гидратации проявляется весьма незначительно даже для блоков 41 и 42. Бетон, уложенный на охлажденное основание (блок 65), весьма интенсивно остывает и начинает замерзать примерно через 12 – 14 ч после укладки. Разность температур блоков 41, 42 и 65 составляет около $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако, в связи с тем, что бетон замерзает при прочности $0,1 R_{28}$, неизвестно, какое температурное поле нулевых напряжений образуется в тонкостенной конструкции. В блоках 41, 42 бетон до начала замерзания набирает прочность $43 - 44\% R_{28}$, что меньше требуемой распалубочной. Таким образом, исследование показывает, что при наружной температуре воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ начальная температура уложенного бетона должна быть более $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, иначе бетон замерзнет и снять опалубку окажется невозможным.

При начальной температуре уложенной бетонной смеси $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура блоков 41, 42 за счет экзотермии цемента поднимается до $+43\text{ }^{\circ}\text{C}$. Бетон этих блоков остывает до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ через 65 ч. Бетон блока 65, контактирующего с холодным основанием, остывает до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ через 20 – 21 ч. Температурные перепады между бетоном блоков 41, 42 и 65 достигают $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Бетон блоков 41, 42 набирает распалубочную прочность $50\% R_{28}$ через 40 ч и при прочности $56\% R_{28}$ замерзает. Расчеты показывают, что при таких условиях бетонирования нельзя обеспечить суточную оборачиваемость опалубки. Лишь при принятии специальных мер по обогреву основания можно обеспечить оборачиваемость опалубки один раз в двое суток. При требуемой распалубочной прочности $70\% R_{28}$ рассматриваемого разогрева бетонной смеси недостаточно, требуются более высокие начальные температуры твердеющего бетона или прогрев бетона в процессе выдерживания.

При начальной температуре уложенной бетонной смеси $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается практически аналогичная картина, хотя бетон, контактирующий с холодным основанием (блок 65), набирает до замерзания прочность $24\% R_{28}$. Данный вариант может быть применен при оборачиваемости опалубки один раз в двое суток при обеспечении предварительного подогрева основания.

При пароразогреве бетонной смеси до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 5.16) бетон блоков 41, 42 за счет экзотермии цемента разогревается до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и через 75 ч остывает до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Бетон блока 65 остывает после укладки до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ через 33 – 34 ч.

Вариант № 335

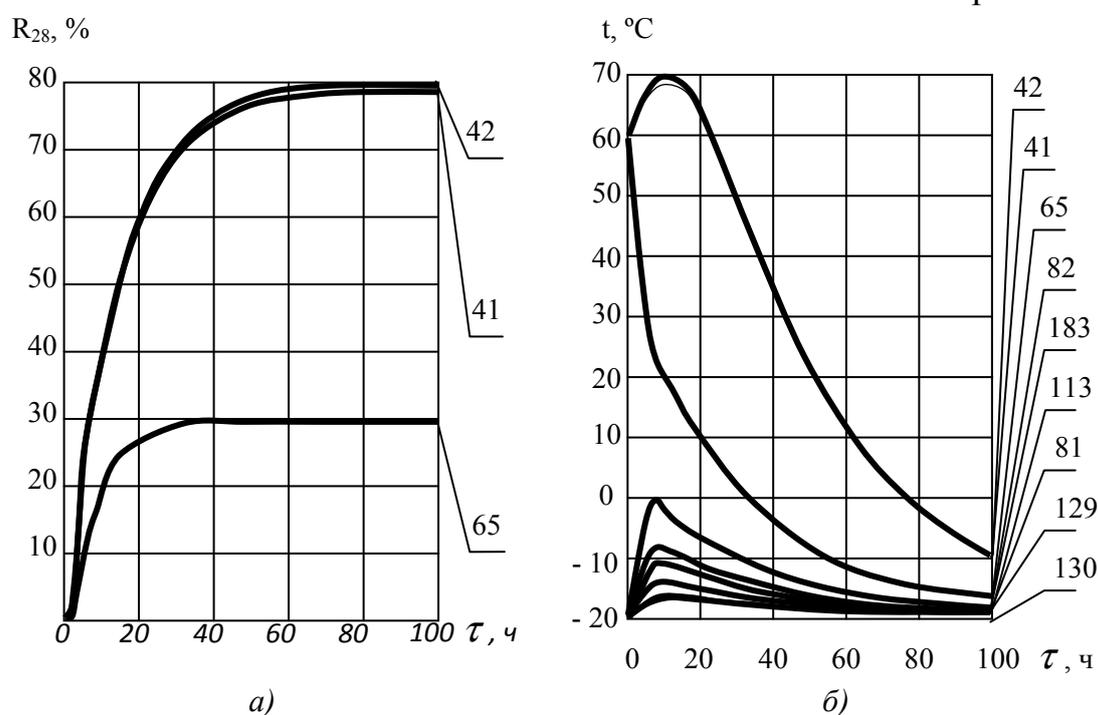


Рис. 5.16. Кинетика роста прочности (а) и изменения температуры (б) бетона при укладке бетонной смеси с начальной температурой $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Перепады температур между блоками 41, 42 и 65 достигают $50 - 52\text{ }^{\circ}\text{C}$, что является ненормальным при выдерживании бетона. Бетон блоков 41, 42 набирает прочность $50\% R_{28}$ через 14 ч после укладки и $70\% R_{28}$ через 30 ч после укладки. Бетон блока 65 до замерзания набирает $30\% R_{28}$.

При использовании пароразогретых бетонных смесей свыше $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно обеспечить односуточную оборачиваемость опалубки. При этом необходимо обеспечить отопление основания до положительной температуры и следить, чтобы отопленное основание не остывало. Это возможно, если

осуществить тепловую изоляцию конструкций из затвердевшего бетона. Установка тепловой изоляции должна осуществляться таким образом, чтобы в затвердевшем бетоне конструкций обеспечивалась одномерность тепловых потоков.

С целью получения материалов по применению пароразогретых в АБС бетонных смесей при возведении тонкостенных конструкций зданий и сооружений из монолитного бетона на цементах, используемых в Набережных Челнах, удобных для практического применения, были разработаны обобщенные графики прочности бетонов в суточном возрасте в зависимости от температуры окружающей среды при начальных температурах бетона в конструкциях 30, 40, 50, 60 °С (рис. 5.17), продолжительности достижения бетоном прочности 50 % R_{28} в зависимости от начальной температуры уложенного бетона при температуре окружающей среды 20, 10, 0, -10, -20 °С (рис. 5.18) и продолжительности достижения бетоном прочности 50 % R_{28} в зависимости от температуры окружающей среды при температуре бетона 30, 40, 50 и 60 °С (рис. 5.19).

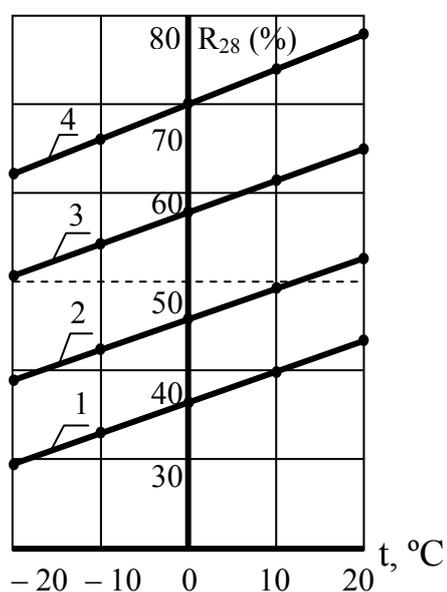


Рис. 5.17. Прочность бетона в суточном возрасте в зависимости от температуры окружающей среды; начальная температура бетонной смеси: +30 °С (1); +40 °С (2); +50 °С (3); +60 °С

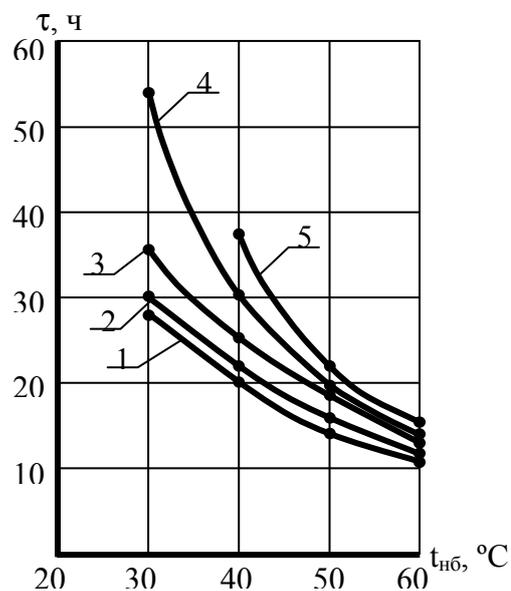


Рис. 5.18. Продолжительность достижения бетоном прочности 50 % R_{28} в зависимости от начальной температуры уложенного бетона; температура окружающей среды: +20 °С (1); +10 °С (2); 0 °С (3); -10 °С (4); -20 °С (5)

Анализ изменения прочности бетона в суточном возрасте в зависимости от температуры окружающей среды при различных температурах уложенного бетона показал (см. рис. 5.17), что при уменьшении температуры среды прочность бетона в суточном возрасте линейно уменьшается. Проведя на графике пунктирную линию, отделяющую прочность бетона более $50 \% R_{28}$, легко получаем информацию об условиях, обеспечивающих суточную оборачиваемость опалубки. График показывает, что при начальной температуре укладываемой бетонной смеси $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ даже при температуре окружающей среды $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ нельзя обеспечить суточную оборачиваемость опалубки.

Учитывая характер графиков, прямые линии могут быть продолжены как в сторону более высоких температур окружающей среды, так и сторону более низких температур, что позволяет расширить возможности применения этих графиков в производственных условиях. Естественно, что при использовании других цементов, обеспечивающих иную кинетику набора прочности твердеющим бетоном, время набора бетоном прочности $50 \% R_{28}$ будет другим (больше или меньше величин, приведенных на графике), но характер этих графиков останется подобным приведенному на рис. 5.17.

Анализируя графики на рис. 5.17, было получено, что прочность бетона данного состава в суточном возрасте R_0 ($\% R_{28}$) может быть представлена в виде эмпирической зависимости

$$R_0 = 1,23t_{н.б} + 0,24t_{н.в}, \quad (5.101)$$

где $t_{н.б}$ – начальная температура уложенного бетона, $^{\circ}\text{C}$; $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Начальная температура уложенного бетона оказывает существенное влияние на продолжительность набора распалубочной прочности, равной $50 \% R_{28}$ (см. рис. 5.18). Повышение температуры разогрева бетонной смеси выше $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ оказывается нецелесообразной не только с точки зрения ухудшения реологических свойств укладываемой бетонной смеси, но и с теплотехнической.

При любых температурах окружающей среды кривые продолжительности набора бетоном прочности $50 \% R_{28}$ сближаются друг с другом. Данные рис. 5.19 подтверждают высказанное положение.

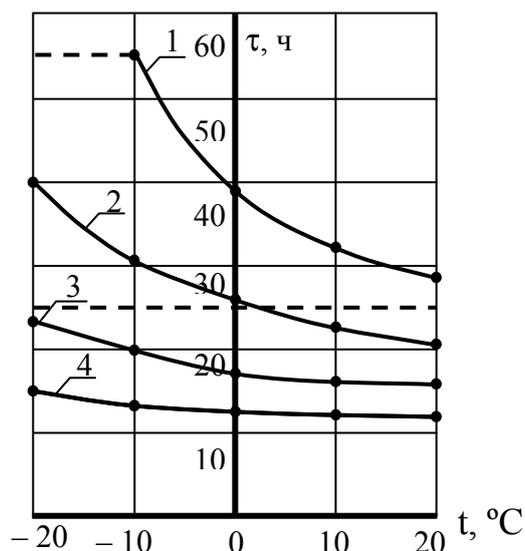


Рис. 5.19. Продолжительность достижения бетоном прочности 50 % P_{28} в зависимости от температуры окружающей среды; начальная температура бетонной смеси: +30 °C (1); +40 °C (2); +50 °C (3); +60 °C (4)

Аналогичные графики могут быть построены на основании выполненных расчетов и для распалубочной прочности 70 % R_{28} . Материал для построения таких графиков представляют рис. 5.15 – 5.16 и другие графики этой серии.

Выполненные исследования одновременно показывают, что при низких температурах бетонных смесей и окружающей среды для достижения высокой оборачиваемости опалубки бетон следует подвергать тепловой обработке. Кроме того, для распространения полученных результатов на другие регионы страны потребуется проведение дополнительных разработок, учитывающих специфику местных условий, применяемые материалы для бетона и т.п.

Как показывает проведенное выше исследование теплового и термонапряженного состояний ограждающих конструкций зданий, возводимых из монолитного тяжелого бетона, при укладке пароразогретых бетонных смесей и последующем термосном выдерживании суточный оборот опалубки при возведении наиболее критических тонкостенных конструкций может быть достигнут как при положительной температуре наружного воздуха, так и при отрицательной. Однако неуправляемое структурообразование бетона может привести к снижению его несущей способности вследствие трещинообразования.

Исследование теплового и термонапряженного состояний ограждающих тонкостенных конструкций зданий и сооружений было продолже-

но с целью снижения возможных отрицательных последствий укладки пароразогретых в АБС бетонных смесей при выдерживании бетона в конструкциях. При тех же условиях, при которых проводилось исследование, представленное ранее, было проведено исследование теплового и термонапряженного состояний ограждающих конструкций зданий, возводимых из монолитного тяжелого бетона, при укладке пароразогретых бетонных смесей и последующем выдерживании их в термоактивной опалубке.

Отличительными параметрами являлись температура наружного воздуха постоянная $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; начальная температура укладываемой пароразогретой бетонной смеси 30, 40, 50 $^{\circ}\text{C}$; температура уложенного ранее бетона 0 $^{\circ}\text{C}$; продолжительность расчетного периода 24 ч. Температура бетонной смеси, уложенной в термоактивную опалубку, поднималась со скоростью 10 $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. Результаты расчета выводились через каждые 4 ч изотермического выдерживания. В данном параграфе представлены варианты расчетов, приведенные в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Варианты моделирования бетонирования конструкций пароразогретыми смесями и выдерживания их в термоактивной опалубке

| Номер варианта | Температура, $^{\circ}\text{C}$ | | Время, ч-мин | | |
|----------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------|
| | пароразогретой бетонной смеси | термоактивной опалубки | при подъеме температуры | при изотермическом выдерживании | Σ |
| 1 | 30 | 60 | 1-30 | 4-00 | 5-30 |
| 2 | 30 | 60 | 1-30 | 8-00 | 9-30 |
| 3 | 30 | 60 | 1-30 | 12-00 | 13-30 |
| 4 | 30 | 60 | 1-30 | 20-00 | 21-30 |
| 5 | 30 | 80 | 2-30 | 8-00 | 10-30 |
| 6 | 30 | 80 | 2-30 | 12-00 | 14-30 |
| 7 | 30 | 80 | 2-30 | 16-00 | 18-30 |
| 8 | 40 | 60 | 1-00 | 4-00 | 5-00 |
| 9 | 40 | 60 | 1-00 | 8-00 | 9-00 |
| 10 | 40 | 60 | 1-00 | 12-00 | 13-00 |
| 11 | 40 | 80 | 2-00 | 4-00 | 6-00 |
| 12 | 40 | 80 | 2-00 | 8-00 | 10-00 |
| 13 | 40 | 80 | 2-00 | 12-00 | 14-00 |
| 14 | 40 | 80 | 2-00 | 16-00 | 18-00 |
| 15 | 50 | 60 | 0-30 | 4-00 | 4-30 |
| 16 | 50 | 60 | 0-30 | 8-00 | 8-30 |
| 17 | 50 | 60 | 0-30 | 16-00 | 16-30 |
| 18 | 50 | 80 | 1-30 | 4-00 | 5-30 |
| 19 | 50 | 80 | 1-30 | 8-00 | 9-30 |
| 20 | 50 | 80 | 1-30 | 12-00 | 13-30 |
| 21 | 50 | 80 | 1-30 | 16-00 | 17-30 |

Выполненная серия расчетов, так же как и представленная выше, позволила получить данные о распределении температур в твердеющем и затвердевшем бетоне и о кинетике роста прочности твердеющего бетона в различных точках конструкций. Результаты исследований позволили сделать выводы, необходимые для разработки предложений по бетонированию пароразогретыми смесями внутренних ограждающих конструкций зданий и сооружений из тяжелого бетона и последующему выдерживанию их в термоактивной опалубке при отрицательной температуре наружного воздуха в практических условиях.

При укладке бетонной смеси с начальной температурой $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, подъеме температуры с $+30$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1,5 ч, изотермическом выдерживании при температуре $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4 ч блоки 41 и 42, удаленные от старого бетона, через 5 ч после укладки разогреваются до температуры $63 - 65\text{ }^{\circ}\text{C}$, а потом медленно остывают. Через 24 ч после укладки их температура достигает $+37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Блок 65, находящийся в контакте со старым бетоном, за счет экзотермии цемента разогревается до температуры $+62\text{ }^{\circ}\text{C}$ через 6 ч, потом медленно остывает. Температура его через 24 ч после укладки составляет $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для распределения температур характерно наличие небольших перепадов температур по поверхности конструкции, величина которых через 24 ч после укладки составляет $+16^{\circ}\text{C}$, что создает условия для формирования благоприятного собственного термонапряженного состояния в этой ограждающей конструкции.

Из-за неравномерного распределения температур по объему тонкостенных конструкций наблюдается и неравномерное нарастание прочности бетона в различных точках. В зонах конструкции, удаленных от старого бетона (блоки 41, 42), бетон интенсивно набирает прочность, которая через 24 ч после его укладки достигает $50\% R_{28}$. В то же время в блоке 65 через сутки после укладки прочность составляет $42\% R_{28}$. Таким образом, условия для суточной оборачиваемости опалубки при данных условиях создаются через 24 ч.

Анализ результатов выполненных расчетов по исследованию температурного режима и прочности твердеющего бетона при укладке бетонной

смеси с начальной температурой +30 °С, подъеме температуры с +30 до +60 °С в течение 1,5 ч, изотермическом выдерживании при температуре +60 °С в течение 8 ч показывает, что бетон в термоактивной опалубке в блоке 42 разогревается до температуры +65 °С, а в блоке 41 – до +63 °С. В блоке 65 бетонная смесь через восемь-девять часов практически имеет ту же температуру, что и в блоке 41. К 24-му часу остывание бетона в блоках 41 и 42 достигает температуры +44 °С, а блоке 65 – +28 °С. Перепад температур в этих блоках составляет те же 16 °С, как и в предыдущем случае, что соответствует формированию благоприятного собственного термонапряженного состояния.

Блоки 41, 42 имеют распалубочную прочность 50 % R_{28} через 20 ч выдерживания бетона, а через 24 ч эта прочность составляет 54 – 55 % R_{28} , а прочность бетона в блоке 65 в суточном возрасте приближается к распалубочной и составляет 48 % R_{28} . При этом к 8 ч выдерживания бетона в рассматриваемых блоках 41, 42 и 65, т.е. зонах с наибольшим отставанием процесса гидратации, при достижении бетоном прочности 0,26 – 0,3 от R_{28} формируется благоприятное собственное термонапряженное состояние. Такие напряжения в бетоне при равномерном распределении температуры по объему конструкции соответствуют температурным полям нулевых напряжений. Таким образом, суточная оборачиваемость опалубки при данных условиях возможна к 20 ч выдерживания бетона.

Аналогичный анализ проведен по всем вариантам, представленным в табл. 5.2. В последнем варианте (21), приведенном на рис. 5.20, представлена графическая интерпретация кинетики роста прочности и изменения температуры бетона при укладке бетонной смеси с начальной температурой +50 °С, подъеме температуры с +50 до +80 °С в течение 1,5 ч, изотермическом выдерживании при температуре +80 °С в течение 16 ч. Как видно, в тонкостенных конструкциях в кратчайшие сроки достигается благоприятное термонапряженное состояние бетона при повышенной его прочности.

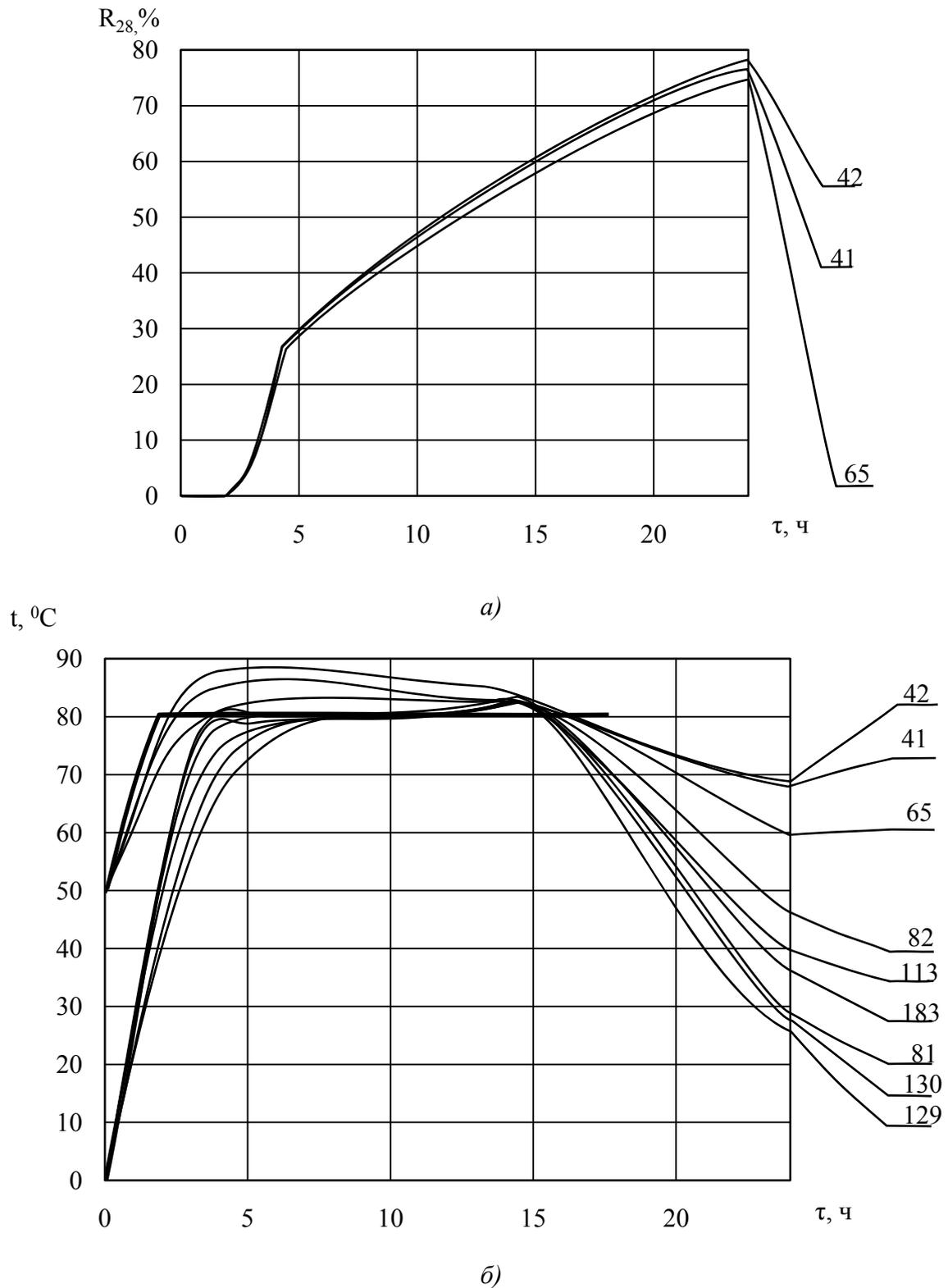


Рис. 5.20. Кинетика роста прочности (а) и изменения температуры (б) бетона при укладке бетонной смеси с начальной температурой +50 °С, подъеме температуры с +50 до +80 °С в течение 1,5 ч, изотермическом выдерживании при температуре +80 °С в течение 16 ч

Проведенные исследования и полученные графические зависимости выявили следующие закономерности:

1. При температуре окружающей среды $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и применении пароразогретых бетонных смесей возможно формирование более благоприятного собственного термонапряженного состояния в конструкциях. Односуточная оборачиваемость опалубки может быть обеспечена при распалубочной прочности $50\% R_{28}$ и начальной температуре уложенного бетона $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при распалубочной прочности $70\% R_{28}$ – при начальной температуре уложенной бетонной смеси не ниже $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. При температуре окружающей среды $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и применении пароразогретых бетонных смесей формирование более благоприятного собственного термонапряженного состояния в конструкциях также возможно. Бетон может за сутки набрать прочность $50\% R_{28}$ и обеспечить суточную оборачиваемость опалубки при начальной температуре уложенного бетона $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. При требуемой распалубочной прочности $70\% R_{28}$ и суточной оборачиваемости опалубки бетон необходимо укладывать с температурой не ниже $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. При температуре окружающей среды $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и применении пароразогретых бетонных смесей формирование более благоприятного собственного термонапряженного состояния в конструкциях возможно при подогреве основания. При этих условиях и начальной температуре уложенной бетонной смеси $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно обеспечить суточную оборачиваемость опалубки. При начальной температуре уложенной бетонной смеси $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и прогреве основания можно обеспечить суточную оборачиваемость опалубки при распалубочных прочностях $50\% R_{28}$ и $70\% R_{28}$.

4. При температуре окружающего воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и применении пароразогретых бетонных смесей формирование более благоприятного собственного термонапряженного состояния в конструкциях возможно при прогреве основания. К тому же это снизит опасность трещинообразования в них. При начальной температуре твердеющего бетона $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в случае предупреждения остывания бетона в контактной зоне можно обеспечить суточную оборачиваемость опалубки при распалубочной прочности $50\% R_{28}$ и один раз в двое суток – при распалубочной прочности $70\% R_{28}$.

5. Исследование температурного режима и прочности твердеющего бетона, укладываемого при температуре наружного воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, свидетельствует о том, что при использовании пароразогретых бетонных смесей

температурой +60 °С и выше можно обеспечить формирование благоприятного собственного термонапряженного состояния в конструкциях и односуточную оборачиваемость опалубки. При этом необходимо обеспечить отопление основания до положительной температуры и следить, чтобы отогретое основание не остывало. Это возможно, если осуществить тепловую изоляцию конструкций из затвердевшего бетона. Установка тепловой изоляции должна осуществляться таким образом, чтобы в затвердевшем бетоне конструкций обеспечивалась равномерность тепловых потоков.

6. Использование пароразогретых смесей, укладываемых в термоактивную опалубку, позволяет добиться суточного оборота опалубки и повышенной прочности бетона в кратчайшие сроки.

Глава 6. РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНИРОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПАРОРАЗОГРЕТЫМИ В АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЯХ СМЕСЯМИ

§ 6.1. Методика назначения технологических параметров производства бетона из пароразогретой смеси

Проведенный анализ предлагаемых решений по совершенствованию бетонирования монолитных конструкций при отрицательной температуре наружного воздуха показывает, что они принципиально не меняют структуры процесса возведения монолитных конструкций, а только добавляют в номенклатуру новые машины, устройства и средства. В строительных организациях повсеместно используют АБС, АБН, комплекты унифицированных опалубок, однако, существенных сдвигов в повышении темпов роста производительности труда не наблюдается.

Необходим пересмотр взглядов на структуру процесса возведения монолитных конструкций, наличие средств для выполнения отдельных операций и процессов, взаимосвязи между этими средствами и возможностями их эффективного использования¹.

Во-первых, необходимо искать пути уменьшения количества операций, переходить на малооперационные технологии. Уменьшение количества операций может быть достигнуто, прежде всего, объединением их выполнения во времени и пространстве: комбинированным воздействием на материал и (или) исключением отдельных операций благодаря изменению свойств материала. Можно совместить приготовление бетонной смеси с ее разогревом, применять бетонные смеси только с разогревом или разогретые бетонные смеси с пластифицирующими добавками, укладка которых исключит или сведет к минимуму необходимость уплотнения.

Во-вторых, устранение противоречия между растущей специализацией техники и эффективным ее использованием может быть достигнуто развитием многофункциональности этой техники. Необходимо исходить из иной концепции в оценке технологических возможностей механизмов и средств в производственном процессе возведения монолитных конструкций. Суть этой концепции заключается в следующем: механизм – не толь-

¹ Работа выполнялась совместно с доктором экономических наук Б.В. Генераловым.

ко средство для выполнения отдельных операций, но и технологически активное средство для комбинирования воздействий. Там, где это возможно, необходимо заменять циклические процессы на непрерывные.

В-третьих, рассматривая процесс возведения монолитной конструкции, необходимо отказаться от подхода, исходящего из потребности выполнения определенного количества операций с определенной интенсивностью, используя для этого либо имеющиеся средства, либо приобретая новые, и рассматривать процесс создания монолитной конструкции как результат существования технической системы. Это правомерно, поскольку существует цель: возведение конкретных монолитных конструкций с минимальными затратами в необходимые сроки. Сейчас используют отдельные элементы таких систем, а известно, что сумма эффектов от использования отдельных элементов существенно ниже суммарного эффекта системы. Техническая система для возведения монолитных конструкций – это совокупность способов воздействия на исходные компоненты: бетонную смесь, арматуру, опалубку и средства, с помощью которых эти способы реализуются. Совокупность способов составляет техническую основу данной технологии. Совокупность средств – машины, механизмы, приспособления, оснастка – создает техническую базу систем. Существование и развитие технической системы как элемента производительных сил подчиняется законам развития производительных сил, составными элементами которых являются разделение, объединение, согласование, преемственность.

В-четвертых, технические системы существуют в рамках определенных организационно-экономических систем. Их уровень определяет и в то же время определяется уровнем технических систем. Кроме того, можно считать, что техническая система более низкого уровня – составная часть (подсистема) системы более высокого уровня. Цель организационно-экономической системы – возведение объектов в заданные сроки с учетом достижения заданных технико-экономических показателей. Таким образом, цели организационно-экономической и технической систем совпадают не полностью. Причем расхождение тем больше, чем меньше специализация организационно-экономической системы, поэтому эффективное использование технической системы возведения монолитных конструкций возможно только в рамках специализированной организации по производству бетонных работ.

Таким образом, необходимо исходить из постулата получения не «сиюминутной» выгоды, а максимальной надежности возводимой моно-

литной конструкции, рассчитанной на наиболее продолжительное время эксплуатации ее, поэтому всегда приоритетным должно быть достижение максимальной прочности бетона при использовании той или иной технологии. А поиск решения согласования получения максимальной прочности бетона при минимальных суммарных затратах – энергетических, финансовых, организационных, производственных и др. – цель создания любой технологии, в том числе и технологии бетонирования монолитных конструкций при отрицательной температуре наружного воздуха пароразогретыми в АБС смесями [198].

Структура производственного процесса возведения монолитных конструкций при отрицательной температуре наружного воздуха пароразогретыми в АБС смесями представлена на рис. 6.1.

В конкретных условиях применения технологии производства бетонных работ с использованием пароразогрева бетонных смесей в АБС [115] учитывают класс возводимых конструкций, расстояние транспортирования, наличие источников пара, ожидаемые отрицательные температуры, состав и подвижность укладываемой в опалубку бетонной смеси, способ подачи и ее укладки, срок готовности и требуемую прочность бетона в конструкции.

В соответствии с этим необходимо выбрать вид и температуру смеси, приготавливаемой на бетонном узле и загружаемой в АБС, место и температуру пароразогрева смеси, конструкцию опалубки и режим выдерживания бетона в ней. Причем, очевидно, рациональным будет такое решение, при котором достигаются необходимые качество конструкции, продолжительность работ, их минимальные трудоемкость и себестоимость. Взаимосвязь цели, результатов, ограничений и определяющих их факторов можно представить в виде схемы (табл. 6.1), пользуясь которой, поэтапно налагая ограничения, отбирают варианты технологического решения.

Таким образом, может быть отобрано несколько технологических схем, каждая из которых будет лучше по одной из технико-экономических оценок и хуже по другим. Это означает невозможность выбора в определенных условиях оптимального решения этого вопроса. Можно лишь считать технологическую схему наиболее подходящей для конкретных условий бетонирования конструкций, если выявлена система предпочтений при принятии решения.

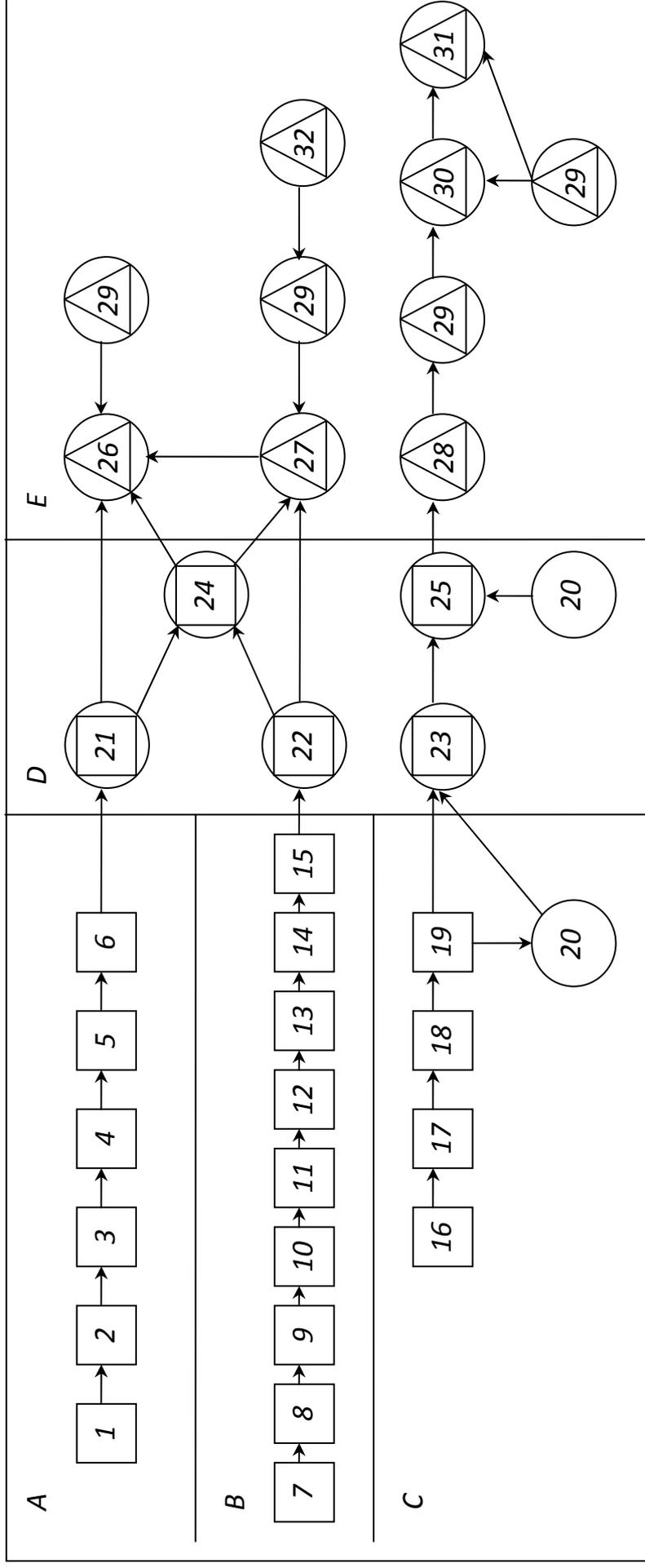


Рис. 6.1. Структура производственного процесса возведения монолитных конструкций: А – заготовка арматуры: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – чистка, правка, гнутье, резка, соединение стержней; В – заготовка опалубки: 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 – разметка, раскрой пиломатериалов, стальных листов и профильного проката, сверление и пробивка отверстий, соединение досок и брусьев в узлы, соединение прокатных профилей в узлы, укрупнительная сборка в крупные блоки, смазка; С – приготовление бетонной смеси: 16, 17, 18, 19, 20 – дозирование, нагрев (разогрев) заполнителей и воды, смешивание, загрузка, разогрев бетонной смеси; D – транспортирование: 21, 22, 23, 24, 25 – арматуры, опалубки, отдозированных компонентов или готовой смеси на приобъектный склад или площадку. E – монтаж, бетонирование, обработка и контроль: 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 – монтаж арматуры, опалубки, бетонирование, контроль качества, воздействие на бетонную смесь, выдерживание бетона, разборка опалубки



Таблица 6.1

Методическая схема к выбору технологического решения бетонирования конструкций парразогревными в автобетоносмесителях смесями

| Формирование цели, определение результата | I ЭТАП | | II ЭТАП | | III ЭТАП |
|--|---|---|--|--|---|
| | Признаки, характеризующие результат | Факторы, определяющие результат | Ограничения для получения результата | Факторы, влияющие на ограничения | |
| Возведение монолитных конструкций на объектах строительства | 1. Класс конструкции: - фундаменты под колонны; - фундаменты под оборудование; - колонны, рамы; - плитные сборно-монолитные | 1. Вид, активность цемента 2. Продолжительность: - выдерживания, - побуждения, - перемешивания 3. Подвижность бетонной смеси 4. Способы: - укладки, - уплотнения 5. Время приложения теплового воздействия 6. Укрытие бетона 7. Распалубочная прочность | 1. Сроки возведения конструкций 2. Затраты на организацию бетонных работ 3. Наличие источников технологического пара на БСУ или (и) строительной площадке; электроэнергии. 4. Материальные ресурсы: - опалубка, - утепление, - трансформаторы, - нагреватели, - коммутационные провода | 1. Характеристика конструкций: - несущие длиной менее 6 м, - несущие длиной 6 м и более, - преднапряженные; - специальные требования по морозостойкости, водонепроницаемости 2. Мощность БСУ по выпуску сухих и товарных смесей 3. Расстояние транспортирования смесей | Технико-экономическая оценка решения 1. Трудозатраты на возведение конструкций 2. Себестоимость возведения конструкций 3. Энергозатраты на приготовление, транспортирование бетонных смесей, выживание бетона 4. Расход материалов 5. Продолжительность возведения 6. Показатель качества |
| Конструкции n классов на m объектах в объеме $\sum_{j=m}^{i=n} V_{ij}$ | 2. Вид бетона: - тяжелый, - легкий, - специальный 3. Класс бетона конструкции: В 7,5, В 10, В 12,5, В 15, В 20, В 25, В 30 | | | | |



Такие задачи относятся к многокритериальным. Для их решения может использоваться многокритериальная модель, которая применительно к задачам зимнего бетонирования развита С.Г. Головневым [13].

Для выбора технологической схемы она примет вид

$$\langle C, M, K, Ш, П, P \rangle, \quad (6.1)$$

где C – цель лица, принимающего решение, – выбор технологической схемы и ее оптимальных параметров, наилучших в смысле каких-то критериев; M – набор вариантов технологических схем; K – набор частных критериев (показателей); $Ш$ – шкала частных критериев, дающая оценку в определенных единицах измерения: трудовых, временных, стоимостных, безразмерных; $П$ – система предпочтений лица, принимающего решения; P – решающее правило, приводящее к упорядочению по предпочтительности принятых критериев оценки технологических схем.

Набор технологических схем M бетонирования монолитных конструкций с пароразогревом бетонной смеси в АБС выбирают с учетом местных условий, наличных материально-технических ресурсов, возможностей строительной организации и т.д.

Цель лица, принимающего решение, как правило, выражается в виде «пожелания» к какой-то величине критерия. Эти пожелания образуют множество допустимых решений. Четко сформулированная цель может быть выражена как стремление к уменьшению некоторого единого (обобщенного) критерия эффективности. Переход к обобщенному критерию может быть осуществлен преобразованием натуральных значений частных критериев в безразмерную шкалу и введением весомости критерия

$$K = \sum_{i=1}^K a_i x_i, \quad (6.2)$$

где K – критерии технологических схем; a_i – коэффициент веса критерия; x_i – его безразмерная форма.

Раскрываем формулу (6.2):

$$K = a_C \left[\frac{(C_i - C_n)}{C_n} \right] + a_T \left[\frac{(T_i - T_n)}{T_n} \right] + a_\tau \left[\frac{(\tau_i - \tau_n)}{\tau_n} \right] + \\ + a_m \left[\frac{(m_i - m_n)}{m_n} \right] + a_\varepsilon \left[\frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_n)}{\varepsilon_n} \right] + a_M \left[\frac{(M_i - M_n)}{M_n} \right], \quad (6.3)$$

где $a_C, a_T, a_\tau, a_m, a_\varepsilon, a_M$ – коэффициенты веса критериев; $C_i, T_i, \tau_i, m_i, \varepsilon_i, M_i$ –

значения частных критериев; $C_n, T_n, \tau_n, m_n, \mathcal{E}_n, M_n$ – нормируемые значения себестоимости, трудоемкости, продолжительности, показателя качества, энергоемкости и материалоемкости для конкретной технологической схемы.

Себестоимость бетонирования C конструкций – функция расстояния транспортирования бетонной смеси l , температурного режима (t – температура, τ – время) и теплофизических свойств опалубки (δ / λ). Выбор вида транспортируемой смеси и места внесения тепла в бетонную смесь связан с ограничением времени транспортирования, разогрева и укладки ($\tau_{mp} + \tau_p + \tau_y$), сроками схватывания τ_c , которые зависят от активности цемента R_u , состава смеси W , ее температуры t и режима транспортирования Π .

Параметры режима транспортирования должны подчиняться следующим условиям:

$$\begin{aligned} \varphi(R_u, W, t, \Pi) \leq \tau_c \leq (\tau_{mp} + \tau_p + \tau_y), \\ (t_{mp \max}, W_{mp \min}) \leq (t_{mp}, W_{mp}) \leq (t_{mp \min}, W_{mp \max}), \end{aligned} \quad (6.4)$$

где $(t_{mp \max}, W_{mp \min})$, $(t_{mp \min}, W_{mp \max})$ – максимально и минимально возможные значения температуры и влажности перевозимой бетонной смеси в АБС.

Главное требование к технологии бетонирования – достижение необходимой (регламентированной) распалубочной прочности. Набор прочности зависит от температурного режима выдерживания (t , τ) и теплофизических свойств опалубки ($\sum \delta / \lambda$).

Эти переменные должны подчиняться ограничениям

$$\begin{aligned} (t_{\min}, \tau_{\max}) \leq (t, \tau) \leq (t_{\max}, \tau_{\min}), \\ (\sum \delta / \lambda)_{\min} \leq \sum \delta / \lambda \leq (\sum \delta / \lambda)_{\max}, \end{aligned} \quad (6.5)$$

где (t_{\min}, τ_{\max}) , (t_{\max}, τ_{\min}) – минимально и максимально возможные температурные режимы; $(\sum \delta / \lambda)_{\min}$ – утеплитель отсутствует; $(\sum \delta / \lambda)_{\max}$ – наибольшая толщина утеплителя. Значение прочности должно находиться в пределах $R_{преб} = (1 \pm 0,05) R_{расч}$.

Теперь можно сформулировать задачу отыскания оптимальных параметров технологической схемы бетонирования:

$$C = f(l, t, \tau, \delta / \lambda) - \min \quad (6.6)$$

или

$$\begin{aligned}\varphi(R_u, W, t, \Pi) &\leq \tau_c \leq (\tau_{mp} + \tau_p + \tau_y), \\ (t_{mp \max}, W_{mp \min}) &\leq (t_{mp}, W_{mp}) \leq (t_{mp \min}, W_{mp \max}), \\ \psi(t, \tau, \sum \delta / \lambda) &= (1 \pm 0,05) R_{расч}, \\ (t_{\min}, \tau_{\max}) &\leq (t, \tau) \leq (t_{\max}, \tau_{\min}), \\ (\sum \delta / \lambda)_{\min} &\leq \sum \delta / \lambda \leq (\sum \delta / \lambda)_{\max}.\end{aligned}\tag{6.7}$$

Необходимо минимизировать функцию f при условии получения $R_{треб}$ или решить задачу (6.7), отыскав экстремумы в областях (6.4) и (6.5).

§ 6.2. Технологический процесс производства бетонных работ пароразогретой в автобетоносмесителе смесью

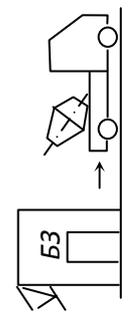
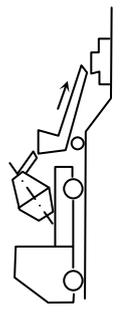
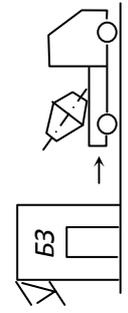
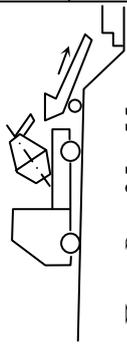
На основании расчетных данных и обобщения производственного опыта разработаны технологические схемы зимнего бетонирования (табл. 6.2) [199]. В схемах учтена возможность загрузки в АБС готовых смесей, в том числе с пластификатором С-3 при температурах 15 – 35 °С; ограничения времени транспортирования в зависимости от его режима и подвижности смеси. Рассмотрены два варианта ожидаемой температуры наружного воздуха –10 и –20 °С и применение трех типов опалубок: деревянной, фанерной и металлической с утеплением. При обеспечении расчетных технологических параметров достигается распалубочная прочность не менее 40 % от марочной (R_{28}).

Схема I. В АБС загружается готовая смесь (ТБ) с температурой 35 °С. При модуле поверхности конструкции M до 4 м⁻¹ распалубочная прочность достигается термосным выдерживанием в утепленной опалубке.

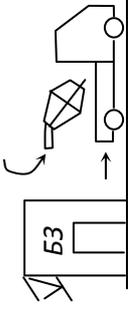
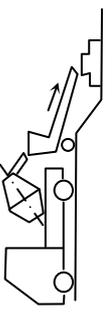
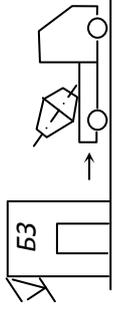
Схема II. Смесь (ТБ₁), загружаемая в АБС, содержит воду $V_2 = (V - V_1)$, где V – количество воды затворения; V_1 – количество воды, вводимой в смесь в виде пара (выбирается в зависимости от модуля поверхности бетонизируемой конструкции и температуры наружного воздуха). Смесь разогревается введением пара на стройплощадке непосредственно перед укладкой до температуры 35 – 55 °С.

Таблица 6.2

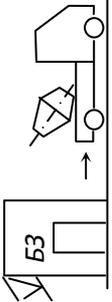
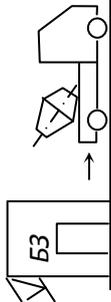
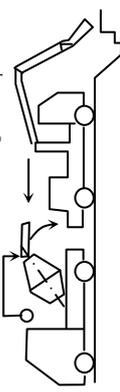
Технологические схемы зимнего бетонирования с применением пароразогрева в автобетоносмесителях и пластификатора С-3

| | Режим транспортирования, $V = 30 \text{ км/ч}$ | | | | Способ подачи бетонной смеси в опалубку | Прочность до заморозания 40% R_{28} , тип конструкций опалубки, условия |
|----|---|--|------------------------------------|--|---|--|
| | Подвижность смеси | Включение барабана сразу после загрузки | Время, мин | Периодичность включения и выключение в пути следования | | |
| I | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | <p>Загрузка, вид смеси, номер схемы</p> <p>ТБ, $t_c = 35^\circ\text{C}$</p>  | <p>1-3 4-6 7-9 10-14</p> <p>До 120 100 80 60</p> | <p>До 100 80 60 45</p> | <p>До 100</p> |  | <p>Деревянная толщиной 40 мм Фанерная, утепленная пенополиуретаном Металлическая, утепленная пенополиуретаном</p> <p>$M \leq 4 \text{ м}^{-1}$ $t_{н.в.} = -10, -20^\circ\text{C}$</p> |
| II | 2 | - | 4 | - | 6 | - |
| | <p>ТБ, $t_c = 15^\circ\text{C}$ $B_2 = (B - B_1)$</p>  | <p>До 120</p> | <p>До 100</p> | <p>До 100</p> |  <p>Перемешивание 3 мин $Пр = B_1 = 35 - 55 \text{ л}$ $t_c = 35 - 55^\circ\text{C}$</p> | <p>$M = 4 - 6, t_{н.в.} = -10^\circ\text{C}$ $Пр = B_1 = 35 \text{ л}$</p> <p>$M = 6 - 10, t_{н.в.} = -10^\circ\text{C}$ $Пр = B_1 = 45 \text{ л}$</p> <p>$M = 6 - 10, t_{н.в.} = -20^\circ\text{C}$ $Пр = B_1 = 55 \text{ л}$</p> |

Продолжение табл. 6.2

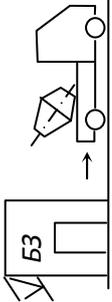
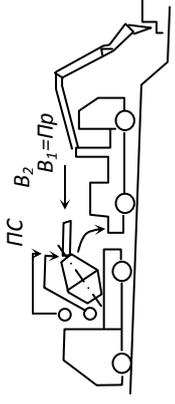
| 1 | Загрузка, вид смеси, номер схемы | Режим транспортирования, $V = 30 \text{ км/ч}$ | | | | 6 | Прочность до замерзания 40 % R_{28} , тип конструкций опалубки, условия |
|-------|---|---|---|--|--|---|---|
| | | 3 Подвижность смеси | 4 Время, мин | | 5 Способ подачи бетонной смеси в опалубку | | |
| | | | Включение барабана сразу после заполнения | Периодическое включение и выключение в пути следования | | | |
| 2 | $\Pi + \text{Ц} + \text{Щ}$, $t_C = t_{н.б}$, $B = B_1 + B_2$, $B_1 = \text{Пр}$, $(\text{Пр} = B_1) + B_2$,  $t_{н.б} = -10^\circ\text{C}$, $\text{Пр} = 65 \text{ л}$, $t_{н.б} = -20^\circ\text{C}$ $\text{Пр} = 70 \text{ л}$ | 3 | 4 | 5 | 7 | | |
| III-A | | 1-3 4-6 7-9 10-14 | До 120 100 80 60 | До 100 80 60 45 |  $M = 4-6 \text{ м}^{-1}$, $t_{н.б} = -10, -20^\circ\text{C}$ | | |
| III-B | $t_C = t_{н.б}$, $\Pi + \text{Щ} + \text{Ц}$  | - | Не ограничено |  $\text{Пр} = B_1$ $B = B_1 + B_2$ $t_{н.б.} = -10^\circ\text{C}$, $\text{Пр} = 60-65 \text{ л}$, $t_{н.б.} = -20^\circ\text{C}$, $\text{Пр} = 60-85 \text{ л}$ $t_C = 35-55^\circ\text{C}$ | $M = 4-6 \text{ м}^{-1}$, $t_{н.б} = -10, -20^\circ\text{C}$, $\text{Пр} = B_1 = 60 \text{ л}$ $M = 6-10 \text{ м}^{-1}$, $t_{н.б} = -10^\circ\text{C}$, $\text{Пр} = B_1 = 65 \text{ л}$ $M = 6-10 \text{ м}^{-1}$, $t_{н.б} = -20^\circ\text{C}$, $\text{Пр} = B_1 = 85 \text{ л}$ | | |

Продолжение табл. 6.2

| 1 | 2 | Режим транспортирования, $V = 30$ км/ч | | | | 6 | 7 |
|----|--|---|-------------------|---|---|--|---|
| | | 3 | Время, мин | | 5 | | |
| | | | Подвижность смеси | Включение барабана сразу после заполнения | | | |
| IV | <p>P_c ТБ $t_c = 35^\circ\text{C}$</p>  | > 14 | 60 | 45 |  | $M \leq 4-6 \text{ м}^{-1}$ $t_{н,б} = -10, -20^\circ\text{C}$ | |
| V | <p>ТБ-1, $t_c = 15^\circ\text{C}$, $B_2 = (B - B_1)$</p>  | - | До 120 | До 100 | <p>Перемешивание 3 мин</p>  <p>P_c $P_p = B_1$</p> <p>$P_p = B_1 = 40-50 \text{ л}$, $t_c = 40-50^\circ\text{C}$</p> | $M = 4-6 \text{ м}^{-1}$ $t_{н,б} = -10, -20^\circ\text{C}$ $P_p = B_1 = 40 \text{ л}$ | |
| | | | | | | $M = 4-6 \text{ м}^{-1}$ $t_{н,б} = -10^\circ\text{C}$ $P_p = B_1 = 50 \text{ л}$ | |
| | | | | | | $M = 6-10 \text{ м}^{-1}$ $t_{н,б} = -20^\circ\text{C}$ Электродный электропрогрев | |



Окончание табл. 6.2

| 1 | 2 | 3 | | | 4 | | 5 | 6 | 7 |
|----|---|-------------------|---------------|---|--|--|---|---|--|
| | | Подвижность смеси | Время, мин | | Включенные барабаны сразу после заполнения | Периодичность включения и выключения в пути следования | | | |
| | Загрузка, вид смеси, номер схемы | | | | | | | | |
| VI | <p>$П + Щ + Ц$, $t_c = t_{н.в.}$</p>  | - | Не ограничено | 4 | 5 | $V = 30 \text{ км/ч}$ | 6 | $V = B_1 + B_2$  | $M = 4 - 6 \text{ м}^{-1}$ $t_{н.6} = -10, -20 \text{ }^\circ\text{C}$ $Pr = B_1 = 65 \text{ л}$ |
| | | | | | | | | $t_{н6} = -10 \text{ }^\circ\text{C}, Pr = 65 \text{ л},$ $t_{н6} = -20 \text{ }^\circ\text{C} Pr = 70 - 75 \text{ л}$ | $M = 6 - 10 \text{ м}^{-1}$, $t_{н.6} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$, $Pr = B_1 = 70 \text{ л}$ |
| | | | | | | | | $Pr = B_1 = 75 \text{ л} + \text{ЭПП}$ | $M = 6 - 10 \text{ м}^{-1}$ $t_{н6} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ |



Схемы III-A и III-B. В АБС загружают отдозированные холодные компоненты смеси. Затем на бетонно-растворном заводе (БЗ) вводится вода в виде пара в количестве $V_1 = P_p$ и вода, нагретая до температуры $35\text{ }^\circ\text{C}$ в количестве $V_2 = V - V_1$. Разогрев смеси от источника пара предусмотрен на строительной площадке, при этом количество вводимого пара выбирается в зависимости от температуры наружного воздуха и массивности конструкции.

Схема IV. В АБС загружают готовую смесь подвижностью более 14 см, пластифицированную суперпластификатором С-3 (P_c ТБ).

Схема V. Загружается смесь с содержанием воды $V_2 = V - V_1$. На стройплощадке вводятся вода в количестве $V_1 = P_p$ в виде пара и суперпластификатор С-3. Подача смеси в опалубку осуществляет АБН.

Схема VI. В АБС загружают отдозированные холодные компоненты ($P + \text{Щ} + \text{Ц}$). Разогрев смеси, введение суперпластификатора и воды производится на строительной площадке. Подача смеси в опалубку осуществляется АБН.

Алгоритмом применения пароразогретых в АБС смесей при бетонировании монолитных конструкций может стать, получивший неоднократное практическое подтверждение, следующий:

- предварительные лабораторные исследования исходных материалов, особенно водопотребности компонентов бетонной смеси, позволяющие оптимизировать подбор составов бетонной смеси с учетом особенностей технологии бетонирования монолитных конструкций;
- расчет параметров пароразогрева бетонной смеси на компьютере;
- компьютерное моделирование получаемой в конструкциях прочности;
- опытное бетонирование реальных конструкций с корректировкой подбора составов бетонной смеси.

Разработан алгоритм решения задачи с расчетом параметров пароразогрева бетонной смеси в АБС (рис. 6.2).

Составлена программа для решения задачи на ЭВМ², произведены расчеты [200] с использованием компьютерной программы (рис. 6.3).

² В разработке программы для ЭВМ принимала участие программист Е.Н. Липатникова.

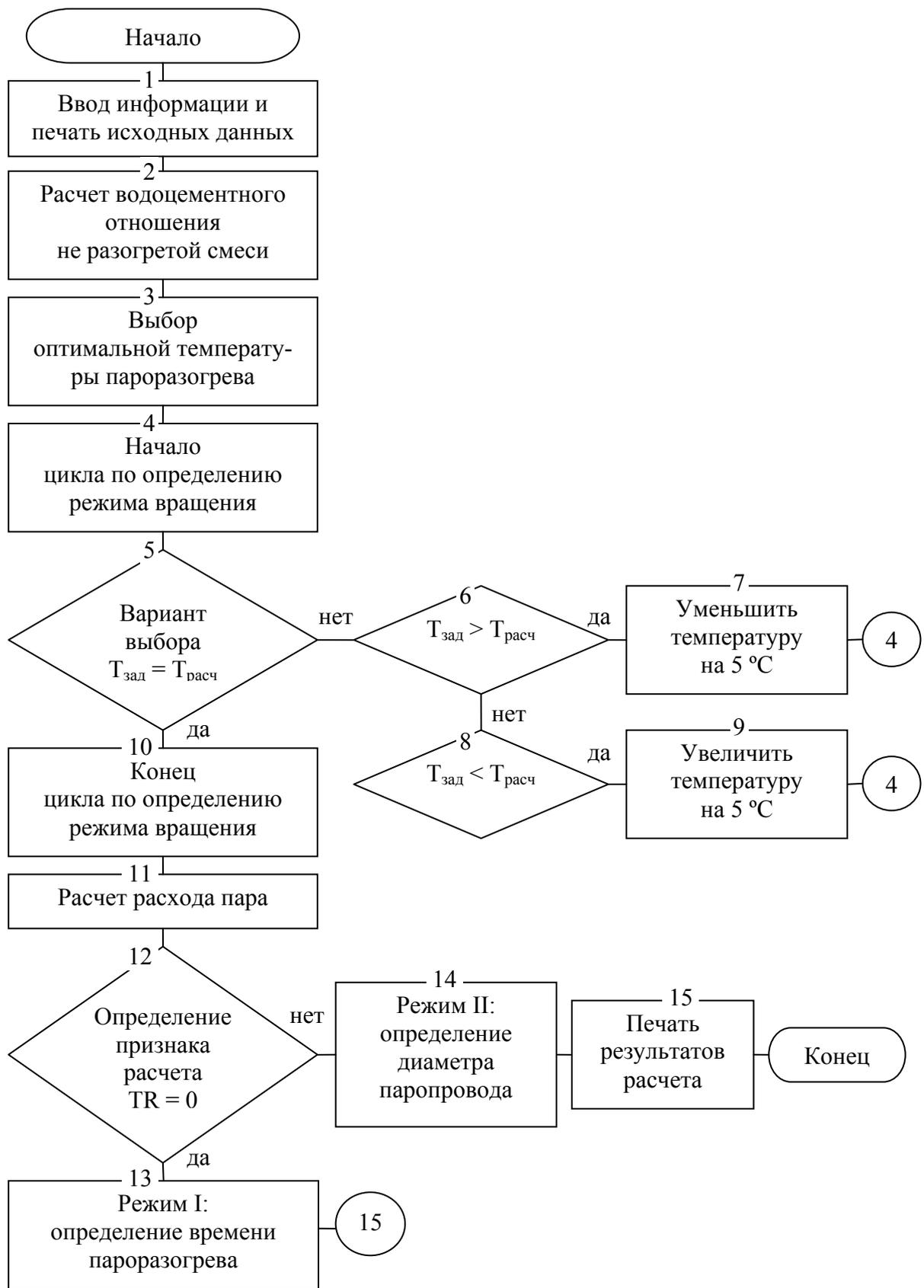


Рис. 6.2. Алгоритм решения задачи «Расчет параметров пароразогрева бетонной смеси в АБС»

Исходные данные:

| | | | |
|-------------|-----|--------------|-----|
| Гр. цемента | 1 | Кач. заполн. | 2 |
| Прочн. бет. | 200 | Акт. цемента | 300 |

Расход материалов на 1м³ :

| | | | |
|--------|-----|-------|-----|
| Цемент | 225 | Песка | 600 |
| Щебня | 900 | Воды | 120 |

Влажность (по массе) :

| | | | |
|-------|---|-------|---|
| Щебня | 4 | Песка | 6 |
|-------|---|-------|---|

Температура :

| | | | |
|--------|----|-------|----|
| Цемент | 10 | Воды | 35 |
| Песка | 10 | Щебня | 10 |

| | | | |
|------------------|-------|---------------|-------|
| Т. наружн. возд. | 0 | Объем | 3.4 |
| Густота теста | 0.255 | Время | 20 |
| Давление пара | 0.2 | Диаметр | 89.00 |
| Степень сухости | 0.9 | Ск. ветра | 5 |
| Вид барабана | 2 | Время разогр. | 0 |

Результаты расчета

| | |
|------------------------------------|---------------------------|
| Водоцементное отношение ВДЦР = | 0.62 |
| Температура пароразогрева TOR = | 65 |
| Режим без вращения | |
| Водосодержание смеси ВР = | 131 л/м ³ |
| ВРО = | 445 л/цикл |
| Расход пара D = | 129.5 кг/цикл |
| Количество конденсата ВК = | 121.0 л/цикл |
| Расход воды ВИС = | 93 л/цикл |
| Удельный объем пара VP = | 0.7974 |
| Расход тепла QC = | 102020 кДж/м ³ |
| Расход тепла с учетом объема QCO = | 346866.3 кДж/цикл |
| Время подачи пара TP2 = | 15 мин |
| Расход пара в заданное время DP = | 537 |

Рис. 6.3. Расчет параметров пароразогрева бетонной смеси в АБС

§ 6.3. Области применения и технико-экономические показатели разработанной технологии

Расчет экономической эффективности выполнен в соответствии с работами [54, 201].

Экономический эффект от использования мероприятий по совершенствованию технологии бетонных работ равен сумме экономических эффектов, полученных от снижения затрат при транспортировании, снижения себестоимости возведения монолитных конструкций, увеличения действительного времени работы АБС и от повышения однородности бетонной смеси [202].

Применение для транспортирования бетонных смесей автобетоновозов и автосамосвалов приводит к дополнительным затратам, обусловленным их конструктивно-технологическими особенностями. Часть затрат зависит от дальности перевозки:

- затраты, вызванные потерями бетонной смеси в процессе транспортирования;
- затраты ручного труда для выгрузки смеси;
- расходы на дополнительную обработку смеси из-за снижения подвижности и расслаивания ее во время перевозки.

Другая часть затрат зависит от объема перевозимой смеси:

- затраты, связанные с потерями при перегрузке;
- расходы по дополнительному оборудованию автобетоновозов с целью предохранения смеси от влияния атмосферных и температурных воздействий.

Транспортирование смесей АБС позволяет избежать большинства перечисленных недостатков или существенно снизить расходы.

На основании анализа, имеющихся данных, а также наблюдений в конкретных условиях потери смеси при транспортировании составляют от 50 до 15 л в зависимости от дальности транспортирования и подвижности смеси.

При расстоянии транспортирования до 15 км потери P_T (%) можно определить по эмпирической формуле

$$P_T = \frac{250}{V_T} Ж, \quad (6.8)$$

где V_T – объем перевозимой смеси в автобетоновозе, л; $Ж$ – подвижность смеси, определяемая осадкой конуса, см.

Потери возрастают с 1 % при подвижности 6 см до 3 % при подвижности 20 см.

Согласно ЕНиР затраты ручного труда T_B (чел.-дн.) при выгрузке 1 м³ могут быть найдены по следующей формуле

$$T_B = \frac{1}{8,2} \left(0,07 + 0,013 \frac{l-15}{5} \right), \quad (6.9)$$

где l – расстояние перевозки, км.

В формуле (6.9) при расстоянии транспортирования менее 15 км второй член не учитывается.

Трудозатраты на дополнительную обработку бетонной смеси T_O (чел.-дн.) в связи со снижением ее подвижности могут определяться по эмпирической формуле

$$T_O = 0,002l. \quad (6.10)$$

Потери при погрузке смеси составляют 7 - 15 л или около 0,5 – 1 % на 1 м³.

Дополнительные затраты на оборудование автобетоновозов и автосамосвалов с целью предохранения смеси от атмосферных и температурных воздействий можно принять равными 0,034 р. на 1 м³.

Тогда затраты C_{II} при перевозке бетонной смеси, обусловленные конструктивно-технологическими особенностями автобетоновозов и автосамосвалов, можно найти по формуле

$$C_{II} = \left[\frac{C_{\sigma}}{100} (П_T + П_{II}) + 0,6(T_B + T_O) + 0,034 \right] V, \quad (6.11)$$

где C_{σ} – стоимость 1 м³ бетонной смеси, р.; $П_{II}$ – потери при перевозке, м³; V – объем перевезенной бетонной смеси, м³.

При среднем расстоянии транспортирования 30 км, перевозке бетонной смеси с осадкой конуса 6 см и стоимостью 1 м³ бетонной смеси 25 р. формула (6.11) примет вид $C_{II} = 0,53V$.

Кроме того, при использовании АБС и загрузке их сухими смесями производительность бетонного узла повышается на 25 – 30 % за счет сокращения технологического цикла.

Удельные затраты при приготовлении бетонной смеси на инвентарных установках могут быть найдены из уравнения

$$C_{\text{год}} = \frac{102}{A} \left(1 + \frac{4,76}{\alpha} \right) + \frac{0,19}{\alpha} (1-h), \quad (6.12)$$

где A – годовая мощность установки, тыс. м³; α – коэффициент использования мощности установки, доли единицы; h – часть сухой смеси в общем объеме продукции, доли единицы.

При годовой мощности установки 25 тыс. м³, коэффициенте загрузки 0,3 $C_{\text{год}} = 7,51$ р./м³ переход на приготовление 50 % сухих смесей снизит $C_{\text{год}}$ до 7,2 р. Или экономия составит 0,31 р./м³ приготовленной бетонной смеси.

Применение АБС позволяет осуществлять активацию цемента, а дооборудование их для пароразогрева бетонной смеси дает возможность круглогодичной эксплуатации и сокращения затрат на выдерживание бетона в опалубке.

Для определения эффективности активации цемента в сочетании с пароразогревом необходимо установить взаимосвязь изменения технических свойств бетонной смеси, бетона и получаемых технологических эффектов (табл. 6.3).

Эффект от расширения технологических возможностей АБС при дооборудовании устройствами для круглогодичной эксплуатации дает увеличение фонда времени, а следовательно, и объема работ. Экономический эффект может быть определен как разница сумм прибыли, получаемой при различных режимах эксплуатации:

$$\mathcal{E} = \Pi(C_2 - C_1)n_1, \quad (6.13)$$

где Π – норматив при эксплуатации АБС; C_2 – стоимость объема работ, выполняемых одним АБС при круглогодичной эксплуатации, р.; C_1 – то же, только при эксплуатации в теплое время года, р.; n_1 – количество круглогодично эксплуатируемых АБС, шт.

Календарный фонд времени (F_k) равен общему количеству дней в году D , т.е. $D = F_k = 365$ дн. = $24 \cdot 365 = 8760$ ч.

Таблица 6.3

Эффективность применения пароразогрева бетонной смеси в автобетононасосителе

| Основной эффект изменения технических свойств бетонной смеси и бетона | Источники экономического эффекта за счет использования технологических эффектов | | | | | |
|---|---|---|----------------------------------|--------------------------------|--|---|
| | Снижение расхода энергии | Снижение трудоемкости | Снижение расхода цемента | Снижение потерь бетонной смеси | Ускорение оборачиваемости фондов | Изменение стоимости оборудования |
| Увеличение однородности бетонной смеси | – | – | Стоимость сэкономленного цемента | Снижение расхода бетона | – | – |
| Увеличение подвижности бетонной смеси | Снижение стоимости энергии на укладку и уплотнение бетонной смеси | Снижение трудозатрат на укладку и уплотнение бетонной смеси | – | – | Уменьшение расходов на амортизацию и эксплуатацию оборудования | Замена оборудования для укладки и уплотнения бетонной смеси |
| Повышение температуры бетонной смеси | Снижение стоимости энергии на нагрев | Снижение трудозатрат на нагрев | – | – | – | Замена оборудования для нагрева |
| Ускорение достижения проектной прочности | Снижение стоимости энергии на тепло-влажностную обработку (ТВО) | Снижение трудозатрат на ТВО | Стоимость сэкономленного цемента | – | Снижение амортизационных расходов | Исключение оборудования для ТВО |
| Повышение прочности бетона | – | – | Стоимость сэкономленного цемента | – | – | – |



Номинальный (режимный) фонд времени F_n АБС зависит от числа выходных D_e и праздничных D_n дней, количества рабочих смен в сутки c и их длительности t_c :

$$F_n = [D - (D_e + D_n)] ct_c, \text{ ч.} \quad (6.14)$$

Действительный фонд времени F_o учитывает затраты времени на ремонт АБС в днях D_p или процентах α_p и техническое обслуживание в днях $D_{m.o}$ или процентах $\alpha_{m.o}$:

$$F_o = F_n - (D_p + D_{m.o}) ct_c = F_n [1 - (\alpha_p + \alpha_{m.o})], \text{ ч.} \quad (6.15)$$

Для АБС при двухсменном режиме $F_n = 4154$ ч, $D_p = 20$ дней или $\alpha_p = 7,7\%$, $D_{m.o} = 8,3$ дня или $\alpha_{m.o} = 31,9\%$.

Критерий выбора варианта производства работ – приведенные затраты Π_i , р., минимум которых свидетельствует о эффективности:

$$\Pi_i = S_i + 0,15K_i \rightarrow \min, \quad (6.16)$$

при этом

$$S_i = 1,09C'_{mat} + C''_{mat} + 1,15Z_i, \quad (6.17)$$

где S_i – общая стоимость способа, р.; K_i – единовременные затраты, р.; C'_{mat} – стоимость материалов, для которых необходим учет транспортных расходов, р.; C''_{mat} – стоимость остальных материалов, р.; Z_i – заработная плата, р.; 1,09 – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы; 1,15 – коэффициент накладных расходов к заработной плате.

Расчеты затрат осуществляются по формулам (6.16) и (6.17), причем учитываются только дополнительные затраты, связанные с особенностями бетонирования при отрицательной температуре, и затраты, неодинаковые для всех сравниваемых вариантов.

При расчете сравнивались четыре варианта производства работ.

Вариант 1. Приготовление готовой бетонной смеси осуществляется на бетоносмесительном узле, затем она загружается в АБС и транспортируется к месту укладки в строительную конструкцию, где после укладки и уплотнения утепляется и выдерживается методом стержневого электродного прогрева до набора бетоном требуемой прочности, после чего коммутационные провода, утепление и опалубка снимаются, а электроды срезаются.

Вариант 2. АБС загружается на бетоносмесительном узле отдозированными увлажненными компонентами бетонной смеси, которые затем разогревают паром, поступающим из теплового пункта от существующей на

бетонном узле котельной, в смесительном барабане АБС до температуры 50 – 70 °С. Приготовленная бетонная смесь транспортируется на строительный объект, где укладывается в конструкцию, утепляется и выдерживается методом термоса до набора бетоном требуемой прочности, после чего утепление и опалубка снимаются.

Вариант 3. АБС загружается на бетонном узле отдозированными сухими или увлажненными компонентами бетонной смеси, которые затем транспортируют на строительную площадку и разогревают паром, поступающим из теплового пункта от существующей на строительной площадке котельной, в смесительном барабане АБС до температуры 50 – 70 °С. Приготовленная бетонная смесь транспортируется к месту укладки в конструкцию, где после укладки утепляется и выдерживается методом термоса до набора бетоном требуемой прочности, после чего утепление и опалубка снимаются.

Вариант 4. АБС загружается на бетоносмесительном узле отдозированными сухими или увлажненными компонентами бетонной смеси, которые затем транспортируются на строительный объект, где разогреваются паром, поступающим от передвижного парообразователя Д-563 до температуры 50 – 70 °С. Приготовленная бетонная смесь укладывается в конструкцию, утепляется и выдерживается методом термоса до набора бетоном требуемой прочности, после чего утепление и опалубка снимаются.

Для варианта 1

$$C'_{\text{мат}} = C_{\text{обор}} + C_{\text{эл}}; \quad (6.18)$$

$$C''_{\text{мат}} = C_{\text{нвз}} + C_{\text{эн}}; \quad (6.19)$$

$$Z_{\text{эн}} = Z_{\text{нвз}} + Z_{\text{эл}} + Z_{\text{обсл}} + Z_{\text{к}}; \quad (6.20)$$

$$T_{\text{эн}} = T_{\text{нвз}} + T_{\text{эл}} + T_{\text{обсл}} + T_{\text{к}}. \quad (6.21)$$

Для вариантов 2, 3, 4

$$C'_{\text{мат}} = C_{\text{обор}}; \quad (6.22)$$

$$C''_{\text{мат}} = C_{\text{П}}; \quad (6.23)$$

$$Z_{\text{пр}} = Z_{\text{д}} + Z_{\text{тр}} + Z_{\text{обсл}} + Z_{\text{к}}; \quad (6.24)$$

$$T_{\text{пр}} = T_{\text{д}} + T_{\text{тр}} + T_{\text{обсл}} + T_{\text{к}}, \quad (6.25)$$

где $C_{\text{обор}}$ – стоимость эксплуатации оборудования, р.; $C_{\text{эл}}$ – стоимость стали для электродов с учетом оборачиваемости, р.; $C_{\text{н.в.з}}$ – стоимость подогрева воды и заполнителей, р.; $C_{\text{эн}}$ – стоимость электроэнергии, р.; $C_{\text{П}}$ – стоимость пара, р.; $Z_{\text{эн}}, T_{\text{эн}}$ – заработная плата, р. и трудоемкость, чел.-дн. электропрогрева; $Z_{\text{пр}}, T_{\text{пр}}$ – заработная плата, р. и трудоем-

кость, чел.-дн. пароразогрева бетонной смеси в АБС; $Z_{п.в.з}, T_{п.в.з}$ – заработная плата, р. и трудоемкость, чел.-дн. по подогреву воды и заполнителей; $Z_{эл}, T_{эл}$ – заработная плата, р. и трудоемкость, чел.-дн. по изготовлению, установке и разборке электродов; $Z_{обсл}, T_{обсл}$ – заработная плата, р. и трудоемкость, чел.-дн. обслуживания, включая монтажные и демонтажные работы; $Z_{к}, T_{к}$ – заработная плата, р. и трудоемкость, чел.-дн. по контролю качества бетонной смеси и бетона; $Z_{д}, T_{д}$ – заработная плата, р. и трудоемкость, чел.-дн. по доустройству АБС под пароразогрев; $Z_{тр}, T_{тр}$ – заработная плата, р. и трудоемкость, чел.-дн., связанные с простоем АБС на посту пароразогрева.

Одинаковыми для всех вариантов приняты следующие затраты:

$C_{ут}$ – стоимость утепления опалубки, р.; $Z_{опал}, T_{опал}$ – заработная плата, р. и трудоемкость, чел.-дн. на устройство опалубки; $Z_{арм}, T_{арм}$ – заработная плата, р. и трудоемкость, чел.-дн. армирования конструкций; $Z_{укл}, T_{укл}$ – заработная плата, р. и трудоемкость, чел.-дн. укладки бетонной смеси в конструкции; $Z_{ут}, T_{ут}$ – заработная плата, р. и трудоемкость, чел.-дн. по утеплению опалубки.

Для варианта 1 – электропрогрев бетона.

Затраты на подогрев воды и заполнителей $C_{п.в.з}$

$$C_{п.в.з} = Z_{т.з} \frac{C_{Гкал}}{C'_{Гкал}}, \quad (6.26)$$

где $Z_{т.з}$ – затраты для III температурной зоны Мосэнерго, р./м³; $C_{Гкал}$ – стоимость 1 Гкал для тех же условий, р.; $C'_{Гкал}$ – стоимость 1 Гкал для рассчитываемой температурной зоны, р.

$$Z_{п.в.з} = k Z_{п.в.зз}; \quad (6.27)$$

$$T_{п.в.з} = T_{п.в.зз}, \quad (6.28)$$

где $Z_{п.в.зз}$, р./м³, $T_{п.в.зз}$, чел.-дн./м³ – соответственно, заработная плата и трудоемкость для III температурной зоны; k – районный коэффициент для рассчитываемой температурной зоны.

Для расчета затрат на электропрогрев бетона в конструкции устанавливаются дополнительные условия: начальная средняя температура бетонной смеси после укладки в опалубку и уплотнения $t_{б.н}$, °С; скорость подъема температуры бетона, средняя по объему конструкции P , °С/ч; температура изотермического прогрева бетона t_u , °С; выбираются электроды (например, электроды стержневые диаметром 6 - 8 мм).

Определяется продолжительность изотермического выдерживания бетона для следующих условий:

- средняя температура за период подъема $t_{\sigma,cp} = (t_{\sigma,n} + t_{\sigma,k}) / 2$, °С;
- время подъема температуры $\tau_n = (t_{\sigma,k} - t_{\sigma,n}) / P$, ч;
- мощность в период подъема температуры P_n , кВт/м³;
- продолжительность изотермического выдерживания τ_u , ч;
- мощность в период изотермического прогрева P_u , кВт/м³;
- средняя температура за период остывания до 5 °С с учетом экзотермии цемента, °С;
- время остывания бетона в конструкции без учета экзотермии цемента $\tau_{ост}$, ч.

Мощность на период подъема температуры с учетом сменного потока бетонной смеси

$$P_n = \Xi \Pi_{см}, \quad (6.29)$$

где Ξ – затраты электроэнергии на прогрев 1 м³ бетона, кВт; $\Pi_{см}$ – средний сменный поток бетона, м³.

Следовательно, для прогрева бетона необходимо $P_n = \Xi \Pi_{см} : 63 = n$ прогревных трансформаторов ТМОБ-63, мощностью 63 кВА каждый.

Расход электроэнергии составит

$$W = P_n \tau_n + P_u \tau_u, \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3. \quad (6.30)$$

Стоимость эксплуатации оборудования находится по формуле

$$C_{обор} = \frac{\sum K_i A_i n}{n_{з.см} \Pi_{см}} \cdot \frac{(\tau_n + \tau_u)}{8} + \frac{0,08 K_i n}{n_{з.см} \Pi_{см}} + \frac{9 n_{пер} n}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ р.} / \text{м}^3, \quad (6.31)$$

где K_i – балансовые стоимости, р.: K_1 – прогревного трансформатора; K_2 – комплекта кабелей и проводов для электропрогрева бетона при соответствующей мощности понижающего трансформатора; A_i – норма амортизационных отчислений: A_1 – прогревного трансформатора; A_2 – комплекта кабелей и проводов для электропрогрева; n – количество понижающих трансформаторов и комплектов кабелей и проводов к ним; $n_{пер}$ – количество перебазирования установок в год; $n_{з.см}$ – количество смен работы трансформаторов в год; $\Pi_{см}$ – средний сменный поток бетона, м³; 0,08 – затраты на текущий ремонт и техобслуживание от капитальных вложений на приобретение; 9 – затраты на перебазирование комплекта оборудования, р.

Единовременные затраты

$$K = \frac{\sum K_i n}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ р./м}^3. \quad (6.32)$$

Стоимость электроэнергии

$$C_{эн} = \frac{C_1 P n}{n_{з.см} \Pi_{см}} \cdot \frac{(\tau_n + \tau_u)}{8} + C_2 W, \text{ р./м}^3, \quad (6.33)$$

где C_1 – основная плата оплачиваемой мощности по двухставочному тарифу для строительных организаций, р./кВА; C_2 – дополнительная плата на стороне вторичного напряжения по двухставочному тарифу территориальной энергоорганизации, р./кВт·ч; P – мощность прогревной установки, кВА.

Затраты по изготовлению, установке и разборке электродов

$$C_{эл} = C'_{см} \frac{m_{эл}}{Q_{эл}}, \text{ р./м}^3, \quad (6.34)$$

где $C'_{см}$ – стоимость 1 кг стали, р.; $m_{эл}$ – масса электродов, затрачиваемых на электропрогрев 1 м³ бетона, кг; $Q_{эл} = 1$ – оборачиваемость электродов.

$$Z_{эл} = (Pac\psi' + Pac\psi'' + Pac\psi''') n_{эл}, \text{ р./м}^3; \quad (6.35)$$

$$T_{эл} = (H.vp' + H.vp'' + H.vp''') n_{эл}, \text{ чел.} \cdot \text{дн./м}^3, \quad (6.36)$$

где $Pac\psi'$, $Pac\psi''$, $Pac\psi'''$, р.; $H.vp'$, $H.vp''$, $H.vp'''$, чел. · дн., – соответственно заработная плата и трудоемкость изготовления, установки и срезки одного электрода; $n_{эл}$ – среднее количество электродов, затрачиваемое на прогрев 1 м³ в конструкции, шт.

Затраты на монтаж и обслуживание установок прогрева

$$Z_{обсл} = \frac{Z'_{обсл} n}{\Pi_{см}}, \text{ р./м}^3; \quad (6.37)$$

$$T_{обсл} = \frac{T'_{обсл} n}{\Pi_{см}}, \text{ чел.} \cdot \text{дн./м}^3, \quad (6.38)$$

где $Z'_{обсл}$, р., $T'_{обсл}$, чел. · дн. – соответственно заработная плата и трудоемкость монтажа и обслуживания одной установки прогрева за смену с районным коэффициентом соответствующей температурной зоны.

Затраты по контролю качества

$$Z_{к} = Pac\psi' \left(\frac{\tau_n}{2} + \frac{\tau_u + \tau_{осм}}{4} \right) \frac{q}{V} + Pac\psi'' \frac{q}{V}, \text{ р./м}^3, \quad (6.39)$$

$$T_{к} = H.vp' \left(\frac{\tau_n}{2} + \frac{\tau_u + \tau_{осм}}{4} \right) \frac{q}{V} + H.vp'' \frac{q}{V}, \text{ чел.} \cdot \text{дн./м}^3, \quad (6.40)$$

где R_{ac}' , р., $H_{вр}'$, чел. · дн. – соответственно расценка и норма времени на один замер температуры для соответствующей температурной зоны; R_{ac}'' , р., $H_{вр}''$, чел. · дн. – соответственно расценка и норма времени по изготовлению и установке одной пробки для тех же условий; q – среднее количество температурных скважин на конструкцию; V – средний объем бетона в конструкции данного модуля, м³.

Для варианта 2 – пароразогрев на бетонном узле.

Стоимость эксплуатации оборудования

$$C_{обор} = \frac{\sum K_i A_i}{n_{з.см} \Pi_{см}} + \frac{0,08 \sum K_i}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ р./м}^3, \quad (6.41)$$

где K_1, K_2, K_3 – соответственно балансовые стоимости теплового пункта на БУ, его оборудования и доустройства АБС под пароразогрев, р.; A_1, A_2, A_3 – соответственно их норма амортизационных отчислений; $n_{з.см}$ – количество смен работы в год при работе в одну смену в зимний период для конкретной температурной зоны; $\Pi_{см}$ – необходимая производительность теплового пункта на БУ по пароразогреву бетонной смеси в АБС в смену, м³.

Единовременные затраты

$$K = \frac{\sum K_i}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ р./м}^3. \quad (6.42)$$

Стоимость пара определим из следующего соотношения: на нагрев 1 м³ бетонной смеси на 1 °С необходимо затратить примерно 1 кг пара при средней теплоемкости 1 м³ бетонной смеси 524 ккал, тогда на разогрев 1 м³ бетонной смеси от 0 до 60 °С необходимо затратить 524 ккал · 60 °С = 31440 ккал/м³ = 0,03144 Гкал/м³, что при стоимости 1 Гкал для конкретной температурной зоны $C'_{Гкал}$, р., составит 0,03144 · $C'_{Гкал}$, руб. Тогда $C_{II} = 0,03144 \cdot C'_{Гкал}$, р./м³.

Затраты по доустройству АБС под пароразогрев

$$Z_{\partial} = \frac{Z'_{\partial}}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ р./м}^3; \quad (6.43)$$

$$T_{\partial} = \frac{T'_{\partial}}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ чел. · дн./м}^3, \quad (6.44)$$

где Z'_d , р., T'_d , чел.·дн. – соответственно заработная плата и трудоемкость доустройства одного АБС для районного коэффициента, принятого в I - III температурных зонах.

Затраты, связанные с простоем АБС на посту разогрева на БУ, определяются из соотношений

$$Z_{тр} = \frac{\tau_p C_{пр}}{V_{б.см}}, \text{ р./м}^3; \quad (6.45)$$

$$T_{тр} = \frac{\tau_p}{V_{б.см}}, \text{ чел.} \cdot \text{дн./м}^3, \quad (6.46)$$

где τ_p – время разогрева бетонной смеси паром в смесительном барабане АБС – максимальное 15 (0,03125 смены), мин; $C_{пр}$ – плата за 1 мин простоя АБС при пароразогреве на посту разогрева на БУ, р.; $V_{б.см}$ – объем разогреваемой бетонной смеси в смесительном барабане АБС конкретной марки, м³.

Затраты на монтаж и обслуживание пароразогрева бетонной смеси в АБС вычисляются по следующим формулам:

$$Z'_{обсл} = \frac{Z'_{обсл}}{П_{см}}, \text{ р./м}^3; \quad (6.47)$$

$$T'_{обсл} = \frac{T'_{обсл}}{П_{см}}, \text{ чел.} \cdot \text{дн./м}^3, \quad (6.48)$$

где $Z'_{обсл}$, $T'_{обсл}$ – соответственно заработная плата, р., и трудоемкость, чел.·дн. монтажа и обслуживания одного поста разогрева на БУ для III температурной зоны.

Затраты по контролю качества бетонной смеси и бетона для условий после разогрева бетонной смеси в смесительном барабане АБС, температура бетонной смеси после транспортирования, подачи, укладки в конструкцию и уплотнения $t_{б.к.}$, °С, средняя температура остывания бетона в конструкции $t_{б.сп.}$, °С до $t_{б.к.}$, °С

$$t_{б.сп} = t_{б.к} + \frac{t_{б.н} - t_{б.к}}{1,03 + 0,181M_n + 0,006(t_{б.н} - t_{б.к})}, \text{ °С}, \quad (6.49)$$

время остывания бетона в конструкции без учета экзотермии цемента $\tau_{ост} = 24$ ч. Тогда

$$Z_{\kappa} = Расц' \frac{q_1}{V_{б.см}} + Расц'' \frac{q_2}{V} + Расц''' (12 + \frac{\tau_{ост} - 24}{4}) \frac{q_2}{V}, \text{ р./м}^3; \quad (6.50)$$

$$T_{\kappa} = Н.вр' \frac{q_1}{V_{б.см}} + Н.вр'' \frac{q_2}{V} + Н.вр''' (12 + \frac{\tau_{ост} - 24}{4}) \frac{q_2}{V}, \text{ чел.·дн./м}^3, \quad (6.51)$$

где $Расц'$, $Расц''$, $Расц'''$, $Н.вр'$, $Н.вр''$, $Н.вр'''$ – соответственно заработная плата, р., и трудоемкость, чел.·дн. одного замера температуры бетонной смеси в смесительном барабане АБС, по изготовлению и установке одной пробки, на один замер температуры в конструкции для III температурной зоны; q_1 , q_2 – соответственно количество замеров температуры в смесительном барабане АБС и в конструкции; $V_{б.см}$ – объем разогретой бетонной смеси в смесительном барабане АБС конкретной марки, м³; V – средний объем бетона в конструкции данного модуля, м³.

Для варианта 3 – пароразогрев на строительной площадке.

Стоимость эксплуатации оборудования

$$C_{обор} = \frac{\sum K_i A_i}{n_{з.см} \Pi_{см}} + \frac{0,08 \sum K_i}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ р./м}^3, \quad (6.52)$$

где K_1 , K_2 , K_3 – соответственно балансовые стоимости теплового пункта на строительной площадке, его оборудования и доустройства АБС под пароразогрев, р.; A_1 , A_2 , A_3 – соответственно их норма амортизационных отчислений; $n_{з.см}$ – количество смен работы в год при работе в одну смену в зимний период для конкретной температурной зоны; $\Pi_{см}$ – необходимая производительность теплового пункта на строительной площадке по пароразогреву бетонной смеси в АБС в смену, м³.

Единовременные затраты

$$K = \frac{\sum K_i}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ р./м}^3. \quad (6.53)$$

Стоимость пара определим из следующего соотношения: на нагрев 1 м³ бетонной смеси на 1 °С необходимо затратить примерно 1 кг пара при средней теплоемкости 1 м³ бетонной смеси 524 ккал, тогда на разогрев 1 м³ бетонной смеси от 0 до 60 °С необходимо затратить 524 ккал · 60 °С = 31440 ккал/м³ = 0,03144 Гкал/м³, что при стоимости 1 Гкал для конкретной температурной зоны $C'_{Гкал}$, р., составит 0,03144 · $C'_{Гкал}$, р.

$$\text{Тогда } C_{\Pi} = 0,03144 \cdot C'_{Гкал}, \text{ р./м}^3. \quad (6.54)$$

Затраты по доустройству АБС под пароразогрев

$$Z_{\partial} = \frac{Z'_{\partial}}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ р./м}^3; \quad (6.55)$$

$$T_{\partial} = \frac{T'_{\partial}}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ чел.} \cdot \text{ дн./м}^3, \quad (6.56)$$

где Z'_{∂} , р., T'_{∂} , чел. · дн. – соответственно заработная плата и трудоемкость доустройства одного АБС для районного коэффициента, принятого в I - III температурных зонах.

Затраты, связанные с простоем АБС на посту разогрева на строительной площадке, определяются из соотношений

$$Z_{mp} = \frac{\tau_p \cdot C_{np}}{V_{б.см}}, \text{ р./м}^3; \quad (6.57)$$

$$T_{mp} = \frac{\tau_p}{V_{б.см}}, \text{ чел.} \cdot \text{ дн./м}^3, \quad (6.58)$$

где τ_p – время разогрева бетонной смеси паром в смесительном барабане АБС – максимальное 15 мин (0,03125 смены), мин; C_{np} – плата за 1 мин простоя АБС при пароразогреве на посту разогрева на строительной площадке, р.; $V_{б.см}$ – объем разогреваемой бетонной смеси в смесительном барабане АБС конкретной марки, м³.

Затраты на монтаж и обслуживание пароразогрева бетонной смеси в АБС:

$$Z_{обсл} = \frac{Z'_{обсл}}{\Pi_{см}}, \text{ р./м}^3; \quad (6.59)$$

$$T_{обсл} = \frac{T'_{обсл}}{\Pi_{см}}, \text{ чел.} \cdot \text{ дн./м}^3, \quad (6.60)$$

где $Z'_{обсл}$, $T'_{обсл}$ – соответственно заработная плата, р., и трудоемкость, чел. · дн. монтажа и обслуживания одного поста разогрева на строительной площадке для III температурной зоны.

Затраты по контролю качества бетонной смеси и бетона для условий: после разогрева бетонной смеси в смесительном барабане АБС, температура бетонной смеси после транспортирования, подачи, укладки в конст-

рукцию и уплотнения $t_{\delta.н}$, °С, средняя температура остывания бетона в конструкции $t_{\delta.ср}$, °С до $t_{\delta.к}$, °С

$$t_{\delta.ср} = t_{\delta.к} + \frac{t_{\delta.н} - t_{\delta.к}}{1,03 + 0,181M_n + 0,006(t_{\delta.н} - t_{\delta.к})}, \text{ °С}, \quad (6.61)$$

время остывания бетона в конструкции без учета экзотермии цемента $\tau_{ост} = 24$ ч. Тогда

$$Z_{\kappa} = Расц' \frac{q_1}{V_{\delta.см}} + Расц'' \frac{q_2}{V} + Расц''' \left(12 + \frac{\tau_{ост} - 24}{4}\right) \frac{q_2}{V}, \text{ р./м}^3; \quad (6.62)$$

$$T_{\kappa} = Н.вр' \frac{q_1}{V_{\delta.см}} + Н.вр'' \frac{q_2}{V} + Н.вр''' \left(12 + \frac{\tau_{ост} - 24}{4}\right) \frac{q_2}{V}, \text{ чел.} \cdot \text{дн./м}^3, \quad (6.63)$$

где $Расц'$, $Расц''$, $Расц'''$, $Н.вр'$, $Н.вр''$, $Н.вр'''$ – соответственно заработная плата, р. и трудоемкость, чел.·дн. одного замера температуры бетонной смеси в смесительном барабане АБС, по изготовлению и установке одной пробки, на один замер температуры в конструкции для III температурной зоны; q_1 , q_2 – соответственно количество замеров температуры в смесительном барабане АБС и в конструкции; $V_{\delta.см}$ – объем разогретой бетонной смеси в смесительном барабане АБС конкретной марки, м³; V – средний объем бетона в конструкции данного модуля, м³.

Для варианта 4 – пароразогрев на строительном объекте.

Стоимость эксплуатации оборудования

$$C_{обор} = \frac{\sum K_i A_i}{n_{з.см} П_{см}} + \frac{0,08 \sum K_i}{n_{з.см} П_{см}} + \frac{З_{пер} n_{пер}}{n_{з.см} П_{см}}, \quad (6.64)$$

где K_1 , K_2 – соответственно балансовые стоимости передвижного парообразователя Д-563 и доустройства АБС под пароразогрев, р.; A_1 , A_2 – соответственно их норма амортизационных отчислений; $n_{з.см}$ – количество смен работы в год при работе в одну смену в зимний период для конкретной температурной зоны; $П_{см}$ – необходимая производительность передвижного парообразователя Д-563 по пароразогреву бетонной смеси в АБС в смену, м³; $З_{пер}$ – затраты на перебазирование парообразователя Д-563, р.; $n_{пер}$ – количество перебазирований парообразователя в зимний период в год.

Единовременные затраты

$$K = \frac{\sum K_i}{n_{з.см} П_{см}}, \text{ р./м}^3. \quad (6.65)$$

Стоимость пара определим из следующего соотношения: расход топлива для получения 1 кг пара в парообразователе Д-563 не превышает 0,08 кг (из технической характеристики); для разогрева 1 м³ бетонной смеси от 0 до 60 °С необходимо затратить примерно 60 кг пара или 0,08 · 60 = 4,8 кг топлива, что составит в денежном выражении 4,8 · 0,12 = 0,576 р. Таким образом, $C_{II} = 0,576$ р./м³.

Затраты по доустройству АБС под пароразогрев

$$Z_{\partial} = \frac{Z_{\partial}^i}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ р./м}^3; \quad (6.66)$$

$$T_{\partial} = \frac{T_{\partial}^i}{n_{з.см} \Pi_{см}}, \text{ чел.·дн./м}^3, \quad (6.67)$$

где Z_{∂}^i , T_{∂}^i – соответственно заработная плата, р., и трудоемкость, чел.·дн., доустройства одного автобетоносмесителя для районного коэффициента, принятого в I - III температурных зонах.

Затраты, связанные с простоем АБС на посту разогрева, определяются из соотношений

$$Z_{mp} = \frac{\tau_p \cdot C_{np}}{V_{б.см}}, \text{ р./м}^3; \quad (6.68)$$

$$T_{mp} = \frac{\tau_p}{V_{б.см}}, \text{ чел.·дн./м}^3, \quad (6.69)$$

где τ_p – время разогрева бетонной смеси паром в смесительном барабане АБС, получаемым от передвижного парообразователя Д-563 – среднее время разогрева бетонной смеси паром 20 мин (0,0417 смены), мин; C_{np} – плата за 1 мин простоя АБС при пароразогреве на посту разогрева, р.; $V_{б.см}$ – объем разогреваемой бетонной смеси в смесительном барабане АБС конкретной марки, м³.

Затраты на монтаж и обслуживание парообразователя и пароразогрева бетонной смеси в АБС

$$Z_{обсл} = \frac{Z_{обсл}^i}{\Pi_{см}}, \text{ р./м}^3; \quad (6.70)$$

$$T_{обсл} = \frac{T_{обсл}^i}{\Pi_{см}}, \text{ чел.·дн./м}^3, \quad (6.71)$$

где $Z'_{обсл}$ $T'_{обсл}$ – соответственно заработная плата, р., и трудоемкость, чел.·дн. монтажа и обслуживания парогенератора Д-563 для III температурной зоны.

Затраты по контролю качества бетонной смеси и бетона для условий: температура бетонной смеси после разогрева ее в смесительном барабане АБС, транспортирования, подачи, укладки в конструкцию и уплотнения $t_{б.н}$, °С, средняя температура остывания бетона в конструкции $t_{б.ср}$, °С до $t_{б.к}$, °С

$$t_{б.ср} = t_{б.к} + \frac{t_{б.н} - t_{б.к}}{1,03 + 0,181M_n + 0,006(t_{б.н} - t_{б.к})}, \text{ °С.} \quad (6.72)$$

Время остывания бетона в конструкции без учета экзотермии цемента $\tau_{ост} = 24$ ч. Тогда

$$Z_k = Расц' \frac{q_1}{V_{б.см}} + Расц'' \frac{q_2}{V} + Расц''' (12 + \frac{\tau_{ост} - 24}{4}) \frac{q_2}{V}, \text{ р./м}^3; \quad (6.73)$$

$$T_k = Н.вр' \frac{q_1}{V_{б.см}} + Н.вр'' \frac{q_2}{V} + Н.вр''' (12 + \frac{\tau_{ост} - 24}{4}) \frac{q_2}{V}, \text{ чел.·дн./м}^3, \quad (6.74)$$

где $Расц'$, $Расц''$, $Расц'''$, $Н.вр'$, $Н.вр''$, $Н.вр'''$ – соответственно заработная плата, р., и трудоемкость, чел.·дн., одного замера температуры бетонной смеси в смесительном барабане АБС, по изготовлению и установке одной пробки, на один замер температуры в конструкции для III температурной зоны; q_1 , q_2 – соответственно количество замеров температуры в смесительном барабане АБС и в конструкции; $V_{б.см}$ – объем разогретой бетонной смеси в смесительном барабане АБС конкретной марки, м³; V – средний объем бетона в конструкции данного модуля, м³.

Тогда полный расчет слагаемых экономической эффективности будет состоять из следующих статей.

Эффективность от снижения затрат при транспортировании \mathcal{E}_1 находится по формуле

$$\mathcal{E}_1 = \frac{\alpha}{100} A_1 C, \quad (6.75)$$

где α – коэффициент снижения потерь; A_1 – объем перевезенной АБС смеси, м³; C – сметная стоимость 1 м³ бетонной смеси, р.

Эффективность от снижения стоимости возведения монолитных конструкций \mathcal{E}_2

$$\mathcal{E}_2 = (C_2 - C_1) A_2, \quad (6.76)$$

где C_1 – себестоимость возведения по новой технологии, р.; C_2 – себестоимость возведения по существующей технологии, р.; A_2 – объем бетонной смеси, уложенной с применением пароразогрева, м³.

Эффективность от увеличения действительного времени работы АБС \mathcal{E}_3

$$\mathcal{E}_3 = \frac{n\Pi}{100} (F_\delta - F'_\delta) C_m, \quad (6.77)$$

где n – количество переоборудованных АБС, шт.; Π – плановая прибыль от работы АБС, %; F_δ – время работы переоборудованного АБС, ч; F'_δ – то же, не переоборудованного, ч; C_m – стоимость продукции за 1 ч работы АБС, р.

Эффективность повышения однородности бетонной смеси \mathcal{E}_4

$$\mathcal{E}_4 = (C_2 - C_1) \frac{C_{ц} A_3}{1000}, \quad (6.78)$$

где C_1 – удельный расход цемента в килограммах на 1 м³ бетонной смеси по новой технологии, кг;; C_2 – то же, по старой, кг; $C_{ц}$ – сметная стоимость 1 т портландцемента, р.; A_3 – объем уложенной модифицированной бетонной смеси, м³.

Суммарный экономический эффект \mathcal{E}_0 от внедрения технологии бетонирования монолитных конструкций при отрицательной температуре наружного воздуха пароразогретыми в АБС смесями составляет

$$\mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4. \quad (6.79)$$

Бетонирование монолитных конструкций пароразогретыми в АБС бетонными смесями [203, 204] независимо от температуры наружного воздуха повышает эффективность производства бетонных работ в монолитном домостроении за счет увеличения сроков оборачиваемости опалубки.

Производственный цикл метода индустриального монолитного строительства, представляющий собой совокупность комплексно-механизированных процессов возведения монолитного или сборно-монолитного здания жилищно-гражданского назначения по индустриальной технологии, должен обеспечить рациональное использование материальных, энергетиче-

ских и людских ресурсов при минимальных сроках строительства. Эта задача может успешно решаться при использовании оптимальной технологии и организации труда.

Специфика возведения зданий по оптимальной технологии имеет свои особенности, которые зависят от архитектурно-планировочных и конструктивных решений зданий, типа применяемой опалубки, от оснащенности строительной организации и ее традиций.

По строительно-технологическим признакам эти здания относятся к однородным объектам, отличающимся применением в них одних и тех же унифицированных конструкций при их равномерном распределении. Это позволяет возводить монолитные здания по стабильной технологии, разбивая их по фронту работ в процессе возведения на одинаковые или неодинаковые участки.

Размеры и объем работ каждого участка зависят от принятых методов возведения стен и перекрытий из монолитного бетона при принятых системах комплекта опалубки и оснастки. Под комплектом опалубки и оснастки понимается минимальный объем этих элементов, обеспечивающий возведение одного здания по технологическим участкам. Коробку здания возводят поэтапно: нулевой цикл, надземная часть здания, крыша. Выполнение основных бетонных и монтажных работ производится по горизонтальной схеме, отделочных работ – по вертикальной.

Особенность технологии возведения монолитных зданий состоит в том, что в условиях строительной площадки особое место занимает возведение стен и перекрытий из монолитного бетона и с целью повышения эффективности строительства необходимо достигнуть максимальной оборачиваемости комплекта опалубки в любое время года.

Анализ строительства домов из монолитного бетона и железобетона в различных регионах страны показал, что возведение коробки здания зачастую осуществляется лишь шесть-семь месяцев в году – с апреля по октябрь. В остальное время года, т.е. в зимний период, строительство не ведется.

Причин здесь много: нехватка достаточных нормативных документов, разработанных головными по проблеме научно-исследовательскими институтами; недостаточная активность головных институтов по внедрению своих рекомендаций по прогрессивным технологиям на показательных стройках страны; низкая активность строителей – как проектировщи-

ков, так и линейных работников, занимающихся методами термообработки бетона без учета специфики монолитного домостроения.

Критерием эффективности монолитного домостроения в достаточной степени может служить получаемая общая площадь перекрытий, обеспечивающая открытый фронт работ в течение суток для проведения смежных работ при строительстве зданий. Достижимая скорость возведения (суточный съём опалубки по поверхности перекрытий) с использованием одного комплекта опалубки колеблется от 20 до 60 – 80 м², а при правильной организации технологии может достигать 120 – 140 м², т. е. повышая темпы оборачиваемости опалубки, можно при минимальном ее объеме получать те же результаты, что и при строительстве с большим количеством опалубки.

Такой оборачиваемости опалубки как в летних условиях, так и зимой невозможно достичь без тепловой обработки бетона, поэтому термообработка бетона для достижения от двух до пяти оборотов опалубки в неделю, независимо от времени года представляет собой технологически сложную задачу.

В идеале постановка задачи ясна: необходимо применить термообработку бетонной смеси и уход за бетоном для обеспечения критической (распалубочной) прочности бетона и надлежащего качества конструкций круглогодично.

Для обеспечения всесезонности строительства и использования максимальной оборачиваемости комплекта опалубки необходимо решить не только организационно-технологическую, но и экономическую задачи, т.е. необходимо применить эффективные методы ускорения твердения бетона, достичь максимальной (суточной) оборачиваемости опалубки.

Стоимость метода всесезонной термообработки бетона, обеспечивающего необходимую распалубочную прочность или критическую относительно замораживания и влагопотерь, устраняющую образование температурно-усадочных трещин в конструкции, при необходимой однородности прочности бетона в различных зонах, можно изобразить в следующем виде:

$$C_{в.м} = C_m + C_{тр} + C_э + EK, \quad (6.80)$$

где C_m – стоимость монтажа и демонтажа опалубки, р.; $C_{тр}$ – стоимость транспортных операций при выполнении опалубочных работ, р.; $C_э$ –

стоимость энергоресурсов, затрачиваемых на термообработку, р.; E – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; K – капитальные вложения на изготовление опалубки и устройств термообработки, р.

Первое слагаемое уравнения (6.80) практически не зависит от принятой технологии, второе – тем меньше, чем меньше перестановок будет с захватки на захватку, – комплект опалубки должен переставляться с одной захватки на другую, минуя пост доводки ее на рабочей площадке складирования и подготовки опалубки к работе. Величина энергозатрат зависит от выбранного метода термообработки или различного сочетания их. В значительной степени стоимость всепогодной термообработки тем меньше, чем больше оборачиваемость опалубки.

Расчет экономической эффективности показывает, что с использованием базы монолитного домостроения мощностью 100 тыс. м² в год только за счет сокращения комплектов опалубки с 13 – 15 до 3 – 4 при пятикратной оборачиваемости в неделю эффект может составить 927 тыс. р.; при четырехкратной оборачиваемости – 741 тыс. р.; при двухкратной – 240 тыс. р. При этом даже при двухкратной оборачиваемости опалубки в неделю затраты на всепогодную технологию производства бетонных работ полностью окупятся менее чем за год только за счет экономической эффективности от сокращения срока строительства.

Комплект опалубки при суточной оборачиваемости (при пятикратной оборачиваемости в неделю) в течение года вырабатывает свой ресурс – 240 оборотов. В то время как при традиционном ведении работ, т.е. семь месяцев в году, необходимо 13 – 15 комплектов опалубки с оборачиваемостью 48 раз в год каждого комплекта.

Следовательно, при всепогодной технологии производства бетонных работ и максимальной пятикратной оборачиваемости опалубки в неделю программу за год в 100 тыс. м² строительное подразделение может осуществить, имея три-четыре комплекта опалубки массой 50 – 55 т каждый, силами одной бригады в 14 – 15 человек, работающей в две смены по семь человек, с одним комплектом опалубки, или всего – 42 – 60 человек бетонщиков [203, 204].

§ 6.4. Методика расчета энергозатрат при применении пароразогретых смесей

При разработке способов возведения монолитных конструкций энергосбережение может быть обеспечено на основе сокращения энергозатрат на всех работах, входящих в комплекс работ при бетонировании: приготовлении бетонной смеси, изготовлении опалубки и арматуры, транспортировании материалов на стройплощадку, производстве работ по монтажу опалубки и арматуры, подаче и укладке бетонной смеси, выдерживании бетона [24, 205].

Были произведены усредненные расчеты по 200 объектам строительства по структуре энергозатрат при температурах от -5 до -40 °С для основных монолитных конструкций: фундаменты под оборудование с $M_n = 1-4$ м⁻¹; фундаменты под каркас и стены зданий с $M_n = 4-6$ м⁻¹; каркасные и плитные конструкции с $M_n = 6-10$ м⁻¹. Данные получены на основе отчетов строительных организаций и путем учета фактических затрат. Расчеты представлены в табл. 6.4.

Анализ энергозатрат на отдельные работы показывает, что наиболее значительная доля приходится на транспортирование бетонной смеси – от 16,1 до 27,1 %; подачу и укладку бетонной смеси – от 12,3 до 23,2 %; выдерживание бетона – от 9,3 до 36,7 %. Причем абсолютные значения энергозатрат с увеличением модуля поверхности конструкции по большинству видов работ возрастают, что приводит к увеличению суммарных затрат с 71,9 до 332 кВт · ч или с 25,8 до 58,9 кг у.т.

Рассмотрение процесса возведения монолитных конструкций в комплексе позволяет выявить основные пути энергосбережения: уменьшение потерь энергии на всех этапах; использование внутреннего тепла экзотермии цемента; уменьшение количества операций; интенсификация бетонных работ на стройплощадке.

Уменьшение потерь энергии может быть достигнуто приготовлением бетонных смесей в зимнее время в утепленных смесительных барабанах АБС [206], внесением тепла в бетонную смесь непосредственно на стройплощадке [207], снижением потерь тепла бетоном в конструкции за счет эффективной теплозащиты.

Таблица 6.4

Энергозатраты на выполнение отдельных видов работ при возведении монолитных конструкций

| Вид работ | Фундаменты под оборудование | | Фундаменты под каркас и стены здания | | Каркасные и плитные конструкции | |
|---|---|--------------------------------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|
| | Энергозатраты | | | | | |
| | электрической и тепловой энергии, кВт · ч | условного топлива, кг/%, всего | электрической и тепловой энергии, кВт · ч | условного топлива, кг/%, всего | электрической и тепловой энергии, кВт · ч | условного топлива, кг/%, всего |
| Приготовление бетонной смеси | 25 – 32 | $\frac{3-3,84}{11,6-9,4}$ | 32 – 39,8 | $\frac{3,84-4,78}{11-9,8}$ | 39 – 46 | $\frac{4,68-5,5}{10,7-9,3}$ |
| Транспортирование бетонной смеси на строительную площадку | – | $\frac{7-10}{27,1-24,4}$ | – | $\frac{7-12,3}{20-25,2}$ | – | $\frac{7-10}{16,1-17}$ |
| Подача, укладка и распределение бетонной смеси | 5,6 – 6 | $\frac{6-7,95}{23,2-19,4}$ | 4,4 – 6 | $\frac{4,95-6}{14,1-12,3}$ | 27 – 33 | $\frac{6-8}{13,8-13,6}$ |
| Изготовление, устройство, разборка и ремонт опалубки | 3,3 – 3,5 | $\frac{3,6-4,8}{14-11,7}$ | 3,5 – 4 | $\frac{4,8-5,2}{13,7-10,6}$ | 14 – 17 | $\frac{5,2-6}{12-10,2}$ |
| Изготовление арматурных каркасов и сеток | 15 – 20 | $\frac{2-2,4}{7,8-5,85}$ | 20 – 30 | $\frac{2,4-3,6}{6,9-7,4}$ | 30 – 40 | $\frac{3,6-4,8}{8,3-8,1}$ |
| Устройство арматуры | 3 – 4 | $\frac{1,8-2,4}{7-5,85}$ | 4 – 6 | $\frac{2,4-2,6}{6,9-5,3}$ | 13 – 16 | $\frac{2,6-3}{6-5,1}$ |
| Выдерживание бетона в опалубке, в т.ч. в зимнее время | 20 – 80 | $\frac{2,4-9,6}{9,3-23,4}$ | 80 – 120 | $\frac{9,6-14,4}{27,4-29,4}$ | 120 – 180 | $\frac{14,4-21,6}{33,1-36,7}$ |
| <i>Итого</i> | 71,9 – 145,5 | $\frac{25,8-40,99}{100}$ | 143,9 – 205,8 | $\frac{34,99-48,88}{100}$ | 243 – 332 | $\frac{43,48-58,9}{100}$ |

Использование тепла экзотермии цемента достигается путем интенсификации реакции гидратации в начальный период выдерживания бетона в конструкции при пароразогреве бетонной смеси в смесительном барабане АБС [208].

Уменьшение количества операций обеспечивается за счет применения технологически активных средств и механизмов, в частности АБС, совмещающих приготовление горячей смеси и транспортирование, подачи горячей смеси по не утепленному бетоноводу АБН, исключения операции вибрирования вследствие увеличения пластифицирующих свойств горячей бетонной смесью. Интенсификация бетонных работ возможна при специализации строительных подразделений и формировании для возведения конструкций производственных систем, включающих все средства и механизмы для комплекса бетонных работ.

При бетонировании монолитных конструкций пароразогретыми в АБС бетонными смесями можно выделить ряд этапов, различающихся между собой характером тепла и массообменных процессов и определяющих суммарные энергозатраты. В настоящем исследовании рассмотрены два этапа – разогрев компонентов бетонной смеси подачей пара в смесительный барабан АБС и транспортирование компонентов бетонной смеси до их пароразогрева или уже пароразогретой смеси (см. рис. 1.8).

Разогрев компонентов бетонной смеси паром, поступающим в барабан АБС, происходит вследствие тепла фазового перехода, выделяющегося при конденсации пара, соприкасающегося с поверхностью компонентов бетонной смеси, а также со стенками и лопастями смесительного барабана АБС.

Энергия пара Q_{np} , необходимая для разогрева бетонной смеси, может быть найдена на основе закона сохранения энергии:

$$Q_{np} = Q_{к.б.с} + Q_{бp} + Q_{m,np} + Q_v. \quad (6.81)$$

В уравнении (6.81) учитываются энергозатраты на разогрев компонентов бетонной смеси $Q_{к.б.с}$, нагрев барабана АБС $Q_{бp}$, теплотери через стенки барабана и испарением $Q_{m,np}$, энтальпию массы воды, конденсировавшейся из пара Q_v .

Энергозатраты на разогрев компонентов бетонной смеси $Q_{к.б.с}$ будут зависеть от состояния загружаемой смеси. При загрузке сухой смеси из предварительно высушенных компонентов

$$Q_{к.б.с}^{сух} = V \left\{ [C_{П}П + C_{Щ}Щ + C_{Ц}Ц] (t_{б.с} - t_{н.в}) + C_B B (t_{б.с} - t_B) \right\}. \quad (6.82)$$

При загрузке увлажненной смесью из неотогретых заполнителей естественной влажности

$$Q_{к.б.с}^{увл} = V \left\{ [C_{П}(WП) + C_{Щ}(WЩ) + C_{Ц}Ц] (t_{б.с} - t_{н.в}) + \rho(WП + WЩ) + C_B B (t_{б.с} - t_B) \right\} \quad (6.83)$$

При загрузке влажной смеси с повышенной влажностью компонентов

$$Q_{к.б.с}^{вл} = V \left\{ [C_{П}(WП) + C_{Щ}(WЩ) + C_{Ц}Ц] (t_{б.с} - t_{н.в}) + C_B B (t_{б.с} - t_B) \right\}. \quad (6.84)$$

При загрузке смоченной смеси с количеством воды затворения до 70 %

$$Q_{к.б.с}^{см} = V \left\{ [C_{П}(WП) + C_{Щ}(WЩ) + C_{Ц}Ц] (t_{б.с} - t_{н.в}) + C_B B_n (t_{б.с} - t_B) \right\}, \quad (6.85)$$

где V – объем компонентов бетонной смеси, загружаемый в барабан АБС, м³; $C_{П}, C_{Щ}, C_{Ц}, C_B$ – соответственно теплоемкость песка, щебня, цемента, воды, кДж/кг · град, $П, Щ, Ц$ – соответственно расходы песка, щебня, цемента, кг/м³; B – нормируемый (расчетный) расход воды, назначаемый с учетом влажности заполнителей, и воды, конденсирующейся из пара (B_n), кг/м³; W – относительные влажности песка, щебня, %; $t_{б.с}$ – температура бетонной смеси после разогрева, °С; $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха, °С; t_B – температура воды, подаваемой в барабан, °С; ρ – теплота плавления льда, кДж/кг.

Энергия на нагрев смесительного барабана АБС

$$Q_{бp} = C_{бp} G_{бp} (t_{б.с} - t_{н.в}), \quad (6.86)$$

где $C_{бp}$ – теплоемкость материала барабана АБС, кДж/кг · град; $G_{бp}$ – масса барабана АБС, кг.

Теплопотери при разогреве бетонной смеси

$$Q_{mnp} = Q_{к} + Q_{p} + Q_{mm} + Q_{u}, \quad (6.87)$$

где $Q_{к}$ – теплопотери конвекцией:

$$Q_{к} = F \alpha \int_0^{\tau} (t_F - t_{н.в}) d\tau, \quad (6.88)$$

где F – площадь наружной поверхности барабана АБС, м²; α – коэффициент теплоотдачи, $\alpha = \omega \rho_{\text{с}} C_{\text{с}}$, где ω – окружная скорость барабана АБС, м/с; $\rho_{\text{с}}$ – плотность среды, кг/м³; $C_{\text{с}}$ – теплоемкость среды, кДж/кг · град; $(t_F - t_{\text{нб}})$ – разность температур поверхности барабана АБС и потока среды, причем $t_F = f(\tau)$, °С.

Теплопотери радиацией

$$Q_p = 5,72 \varepsilon F \int_0^{\tau} \left[\left(\frac{T_F}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{нб}}}{100} \right)^4 \right] d\tau, \quad (6.89)$$

где 5,72 – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, Вт/м² · К⁰; ε – приведенная степень черноты наружной поверхности барабана АБС; T_F , $T_{\text{нб}}$ – соответственно температура поверхности барабана АБС и среды, К⁰.

Теплопотери теплопроводностью

$$Q_{\text{мнн}} = \int_0^{\tau} d\tau \int_F q_{F\tau} dF, \quad (6.90)$$

где $q_{F\tau} = \frac{\lambda}{S} (t_F - t_{\text{нб}})$; λ – коэффициент теплопроводности стенки барабана АБС, Вт/м · град; S – толщина стенки, м.

Теплопотери за счет испарения воды

$$Q_u = G_B r, \quad (6.91)$$

где G_B – количество воды, испарившееся из барабана АБС за период разогрева, кг; r – теплота парообразования при атмосферном давлении, кДж/кг.

Энтальпия массы воды, конденсировавшейся из пара,

$$Q_{\text{с}} = C_B B_n t_{\text{с.с}}. \quad (6.92)$$

Теплопотери при транспортировании $Q_{\text{мнн}}$ могут быть найдены из уравнений (6.89) – (6.91) с учетом времени транспортирования τ_T , количества испарившейся влаги G_B^T при транспортировании и температуры поверхности $t_F = f(\tau_T)$. Тогда расход энергии на транспортирование бетонной смеси

$$Q_T = Q_{\text{мнн}} + Q_{\text{ас}} + Q_{\text{сп}}, \quad (6.93)$$

где $Q_{ав}$ – расход энергии на перемещение АБС от бетоносмесительного узла до строительного объекта; $Q_{вр}$ – расход энергии на вращение барабана АБС:

$$Q_{ав} = \frac{1}{50} M_{ав} E_{мон} L, \quad (6.94)$$

где $M_{ав}$ – расход топлива на 100 км, л; $E_{мон}$ – теплотворная способность топлива, кДж/л; L – расстояние от БСУ до строительного объекта, км.

$$Q_{вр} = M_{б} E_{мон} \tau_T, \quad (6.95)$$

где $M_{б}$ – расход топлива за 1 ч на вращение барабана АБС.

Тогда энергозатраты, необходимые для осуществления бетонирования монолитных конструкций пароразогретыми в АБС смесями, будут составлять (см. рис. 1.8):

по I схеме

$$Q_I = Q_{вр} + Q_T, \quad (6.96)$$

по II схеме

$$Q'_{II} = Q_T + Q_{вр} \quad (6.97)$$

или

$$Q''_{II} = Q'_T + Q_{вр} + Q''_T, \quad (6.98)$$

по III схеме

$$Q'_{III} = Q'_{вр} + Q'_T + Q''_{вр} \quad (6.99)$$

или

$$Q''_{III} = Q'_{вр} + Q'_T + Q''_{вр} + Q''_T. \quad (6.100)$$

Комплексный подход при использовании малооперационной энергосберегающей технологии, которой является технология бетонирования монолитных конструкций пароразогретыми в АБС смесью, может обеспечивать снижение энергозатрат на 20 - 200 кВт · ч или на 2,4 - 24 кг у.т. на 1 м³ бетона.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ предлагаемых решений по совершенствованию бетонирования монолитных конструкций при отрицательной температуре наружного воздуха показывает, что они принципиально не меняют структуры процесса возведения монолитных конструкций, а только добавляют в номенклатуру новые машины, устройства и средства.

2. Предлагается пересмотр взглядов на структуру процесса возведения монолитных конструкций, наличие средств для выполнения отдельных операций и процессов, взаимосвязи между этими средствами и возможностями их эффективного использования: а) необходимо искать пути уменьшения количества операций, переходить на малооперационные технологии; б) устранение противоречия между растущей специализацией техники и эффективным ее использованием может быть достигнуто развитием многофункциональности этой техники; в) рассматривая процесс возведения монолитной конструкции, необходимо отказаться от подхода, исходящего из потребности выполнения определенного количества операций с определенной интенсивностью, используя для этого либо имеющиеся средства, либо приобретая новые, а рассматривать процесс создания монолитной конструкции как результат существования технической системы; г) технические системы существуют в рамках определенных организационно-экономических систем, поэтому эффективное использование технической системы возведения монолитных конструкций возможно только в рамках специализированной организации по производству бетонных работ.

3. Разработана структура производственного процесса возведения монолитных конструкций пароразогретыми в АБС смесями, учитывающая класс возводимых конструкций, расстояние транспортирования, наличие источников пара, ожидаемые отрицательные температуры, состав и подвижность укладываемой в опалубку бетонной смеси, способ подачи и ее укладки, срок готовности и требуемую прочность бетона в конструкции.

4. Разработана методическая схема выбора технологического решения бетонирования конструкций пароразогретыми в АБС смесями, учитывающая взаимосвязь цели, результатов, ограничений и определяющих их факторов, используя которую, поэтапно налагая ограничения, отбирают варианты технологического решения.

5. Разработана методика назначения технологических параметров производства бетона из пароразогретыми в АБС смеси при достижении минимальной себестоимости бетонирования C конструкций, которая является функцией расстояния транспортирования бетонной смеси l , температурного режима (t – температура, τ – время) и теплофизических свойств опалубки (δ / λ). При этом выбор вида транспортируемой смеси и места внесения тепла в бетонную смесь связан с ограничением времени транспортирования, разогрева и укладки ($\tau_{mp} + \tau_p + \tau_y$), сроками схватывания

τ_c , которые зависят от активности цемента R_u , состава смеси W , ее температуры t , и режима транспортирования $П$.

6. На основании расчетных данных и обобщения производственного опыта разработаны технологические схемы зимнего бетонирования, в которых учтена возможность загрузки в АБС готовых смесей, в том числе с пластификатором С-3, при температурах 15 – 35 °С; ограничения времени транспортирования в зависимости от его режима и подвижности смеси. Рассмотрено два варианта ожидаемой температуры наружного воздуха –10 и –20 °С и применение трех типов опалубок: деревянной, фанерной и металлической с утеплением. При обеспечении расчетных технологических параметров достигается распалубочная прочность не менее 40 % от марочной (R_{28}).

7. Разработаны алгоритмы применения пароразогретых в АБС смесей при бетонировании монолитных конструкций и решения задачи с расчетом параметров пароразогрева бетонной смеси в АБС. Составлена программа для решения задачи на ЭВМ. Произведены расчеты с использованием компьютерной программы.

8. Произведено сравнение эффективности использования АБС, автосамосвалов и автобетоновозов. Затраты $C_{П}$ при перевозке бетонной смеси, обусловленные конструктивно-технологическими особенностями автосамосвалов и автобетоновозов, определены на основании полученных эмпирических зависимостей: потери бетонной смеси $П_T$ от объема перевозимой смеси в автобетоновозе V_T и подвижности смеси $Ж$, а также трудозатрат на дополнительную обработку бетонной смеси T_0 от снижения ее подвижности. При использовании АБС и загрузке их сухими смесями производительность бетонного узла повышается на 25 – 30 % за счет сокращения технологического цикла. Выведена зависимость удельных затрат при приготовлении бетонной смеси для АБС на инвентарных установках от годовой мощности установки A , коэффициента использования мощности установки α и части сухой смеси в общем объеме продукции h .

9. Применение АБС позволяет осуществлять активацию цемента, что приводит к сокращению затрат на выдерживание бетона в опалубке. Для определения эффективности активации цемента в сочетании с пароразогревом установлены взаимосвязи изменения технических свойств бетонной смеси, бетона и получаемых технологических эффектов.

10. Дооборудование АБС для пароразогрева бетонной смеси дает возможность их круглогодичной эксплуатации. Эффект от расширения технологических возможностей АБС при дооборудовании устройствами для круглогодичной эксплуатации дает увеличение фонда времени, а следовательно, и объема работ. Установлены следующие зависимости экономического эффекта как разницы сумм прибыли, получаемой при различных режимах эксплуатации; номинального фонда времени F_n АБС от числа выходных D_e и праздничных D_n дней, количества рабочих смен в сутки C и их длительности t_c ; действительного фонда времени F_d от затрат времени на ремонт АБС (в днях D_p или % α_p) и техническое обслуживание их (в днях D_{mo} или % $\alpha_{m.o}$).

11. Экономический эффект от использования мероприятий по совершенствованию технологии бетонных работ равен сумме экономических эффектов, полученных от снижения затрат при транспортировании, себестоимости возведения монолитных конструкций, увеличения действительного времени работы АБС и от повышения однородности бетонной смеси.

12. Разработана методика оценки технической, социальной и экономической эффективности технологии бетонирования конструкций пароразогретой смесью.

13. Разработана методика расчета суточного оборота опалубки в монолитном домостроении.

14. Разработана методика расчета энергозатрат при применении пароразогретых смесей.

Глава 7. АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

§ 7.1. Первые производственные испытания технологии возведения монолитных конструкций из тяжелого бетона на объектах промышленного строительства Владимирской области

После проведения теоретических и экспериментальных исследований автором в октябре 1980 года впервые была осуществлена производственная проверка технологии бетонирования монолитных конструкций бетонными смесями, разогретыми паром в смесительном барабане АБС. Первыми конструкциями, забетонированными пароразогретой в АБС смесью в осенне-зимний период 1980 – 1981 годов, были фундаменты котельной II-й очереди свинокомплекса во Владимирской области (рис. 7.1) [24]. Строительство зданий и сооружений комплекса осуществляла ПМК-200 строительного-монтажного треста №1 ГлавВладимирСтроя Минстроя СССР.



Рис. 7.1. Первые монолитные конструкции, возведенные с применением пароразогретых в АБС бетонных смесей, - фундаменты здания котельной

Разогрев компонентов бетонной смеси паром производился в смесительном барабане АБС С-1036 Б, который представлял собой гравитационный реверсивный бетоносмеситель, установленный на шасси автомобиля МАЗ-5549. Пар подавался в смесительный барабан через загрузочно-разгрузочное отверстие, которое в целях уменьшения тепловых потерь в атмосферу было закрыто. Ввод пара производился через трубу диаметром $1\frac{1}{4}$ " и длиной около 1 м, вмонтированную в смеситель (рис. 7.2).



Рис. 7.2. Дооборудование первого АБС С-1036 Б под пароразогрев

АБС загружался отдозированными сухими компонентами бетонной смеси и подъезжал к котельной, находящейся на строящемся комплексе (рис. 7.3). В течение 10 – 15 мин пар температурой 130 – 150 °С и под давлением 0,3 – 0,45 МПа подавался в смесительный барабан, после чего в течение 1 – 3 мин вводилась вода температурой 60 – 70 °С под давлением 0,6 – 0,7 МПа до получения заданного водоцементного отношения смеси.



Рис. 7.3. Разогрев компонентов бетонной смеси в АБС паром, поступающим из существующей на строительной площадке котельной

После получения первых положительных результатов отработка технологии была продолжена и на других строительных объектах II очереди [206]. С целью уменьшения тепловых потерь в атмосферу на основании теплотехнического расчета смесительный барабан АБС был утеплен пенополиуретаном толщиной от 2 до 5 см (рис. 7.4).



Рис. 7.4. Дооборудование второго АБС С-1036 Б под пароразогрев бетонной смеси с утеплением смесительного барабана пенополиуретаном

После дозирования компонентов смеси в соответствующем объеме на бетонном узле она последовательно (песок, крупный заполнитель, цемент) загружалась в смесительный барабан АБС (рис. 7.5).

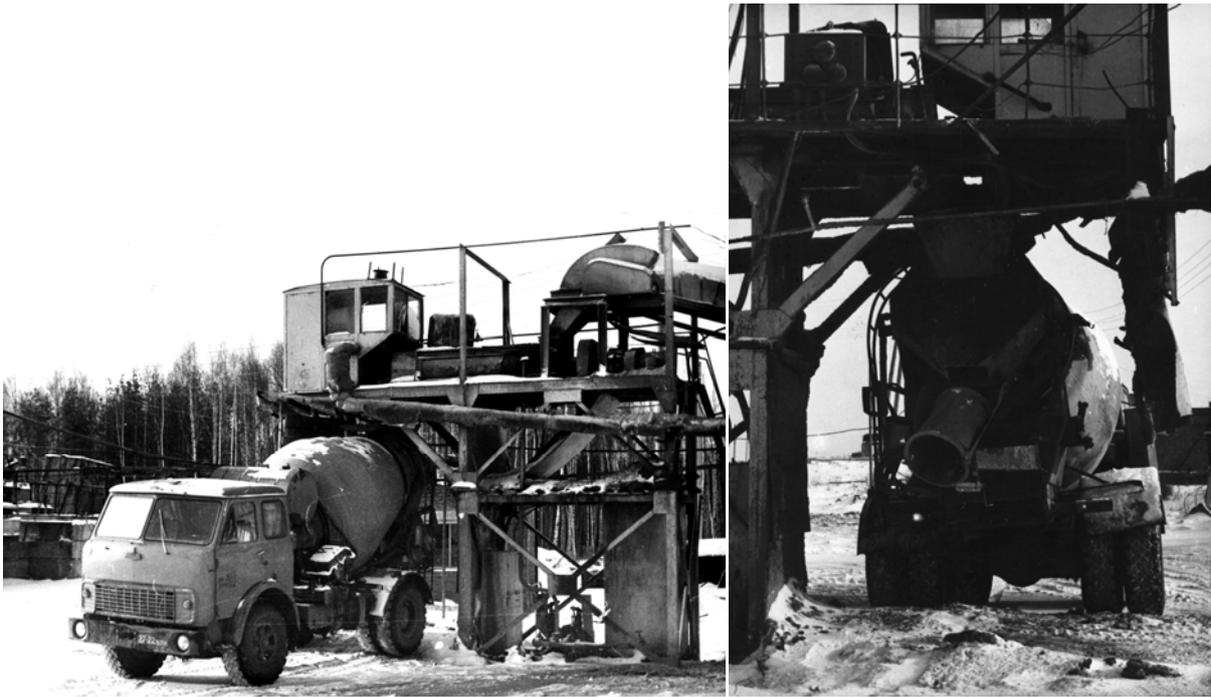


Рис. 7.5. Загрузка АБС сухими отдозированными компонентами бетонной смеси при последовательной их подаче

Рядом с существующей на строительной площадке котельной был оборудован пост пароразогрева (рис. 7.6).



Рис. 7.6. Оборудование поста пароразогрева бетонной смеси в АБС на строительной площадке

Впоследствии технология нашла применение при строительстве других промышленных объектов, возводимых подразделениями строительномонтажного треста № 1 – ПМК-178, СМУ-11, СМУ «Киржачстрой». Кроме АБС марки С-1036 использовались АБС СБ-92-1А на базовом шасси КамАЗ-5511 (рис. 7.7).



Рис. 7.7. АБС СБ-92-1А, переоборудованные под пароразогрев

Смесительные барабаны всех АБС утеплялись пенополиуретаном толщиной от 2 до 5 см. Была опробована технологическая схема с применением пара из существующего на строительной площадке стационарного паропровода (рис. 7.8).



Рис. 7.8. Разогрев паром от паропровода на строительной площадке

Пароразогретая в АБС бетонная смесь укладывалась в металлическую опалубку с последующим укрытием только колпаками из ДВП (рис. 7.9).



Рис. 7.9. Укладка пароразогретой в АБС бетонной смеси в опалубку фундаментов по лотку и утепление колпаками из ДВП

Время от разогрева до укладки бетонной смеси в конструкцию не превышало 30 мин, а весь цикл – 1 ч. Начиная с загрузки и до полной разгрузки, в целях обеспечения однородности бетонной смеси при смешивании компонентов, равномерного проникновения пара, предотвращения расслоения перевозимой смеси и сохранения ее технологических свойств, бетонная смесь в смесителе постоянно или периодически перемешивалась. При этом температура смеси понижалась не более чем на 2 °С.

В конструкциях использовались бетоны В-15 - В-25 на портландцементных М 400 Ульяновского и Мордовского, и М 500 с минеральными добавками Вольского цементных заводов. Температура бетонной смеси после укладки в конструкцию составляла 50 – 55 °С. При модулях поверхности конструкций до 8 м⁻¹ и температурах наружного воздуха до –20 °С бетон выдерживался методом термоса в деревянной, фанерной или металлической опалубке с поверхностным утеплением минераловатными плитами. Это обеспечивало суточный набор бетоном прочности до 60 – 90 %.

Загрузка АБС производилась отдозированной сухой смесью компонентов бетона из заполнителей естественной влажности, смоченной сме-

сью и готовой смесью. Ввод пара в смесительный барабан осуществлялся по трубе диаметром 50 мм, соединенной с термостойким шлангом, снабженным на конце быстросъемным соединением. Приготавливалась бетонная смесь разных марок и объемов (1, 2, 2,5 м³). Бетонная смесь транспортировалась на различные расстояния с периодическим замером ее температуры через аварийный люк в смесительном барабане АБС.

Давление пара регулировалось в зависимости от состава, объема, времени разогрева приготавливаемой смеси в пределах от 0,1 до 0,6 МПа. С целью получения заданного водоцементного отношения смеси в нее вводилась вода или совместно с паром, или после его подачи. Причем температура воды равнялась температуре приготавливаемой смеси или была выше и изменялась от 40 до 80 °С. Время приготовления смеси не превышало 15 мин, а температура приготавливаемой смеси составляла 50 – 70 °С. После приготовления горячая бетонная смесь транспортировалась с периодическим или непрерывным побуждением. Укладывалась бетонная смесь в конструкции с модулем от 4 до 8 м⁻¹ в течение 10 – 30 мин.

Впоследствии на основании проведенных исследований для регулирования сроков удобоукладываемости пароразогретых смесей была применена добавка суперпластификатора С-3 [207].

§ 7.2. Производственные испытания технологии возведения монолитных конструкций из тяжелого бетона на объектах специального строительства Кемеровской области

Начиная с января 1981 года, производственные испытания и внедрение технологии осуществлялись при строительстве зданий и сооружений в г. Кемерово и Кемеровской области. Первыми объектами были резервуар и убежище. Отличительная особенность этих объектов – высокая насыщенность арматурой и технология бетонирования с пароразогревом бетонной смеси в автобетоносмесителях стала единственной, с использованием которой удалось круглогодично решать поставленные перед строителями задачи [116, 208, 209]. Бетонирование пароразогретыми смесями осуществлялось подразделениями Главного территориального управления по строительству в Кемеровской области.

Пароразогрев бетонной смеси производился в смесительном барабане АБС СБ-92, который представлял собой гравитационный реверсивный

бетоносмеситель, установленный на шасси автомобиля КрАЗ-258. Для подогрева воды в водяной бак, имеющийся на АБС, вводили регистр, по которому пропускались выхлопные газы базового автомобиля. В аварийный люк смесительного барабана был вмонтирован температурный датчик, по которому контролируют температуру бетонной смеси внутри барабана. Для введения пара в смесительный барабан АБС загрузочно-разгрузочное устройство и горловина смесительного барабана были закрыты, а внутрь барабана была введена стальная труба диаметром 40 мм и длиной 1,2 м, к которой подведен термостойкий шланг, снабженный на конце быстроразъемным соединением (рис. 7.10).

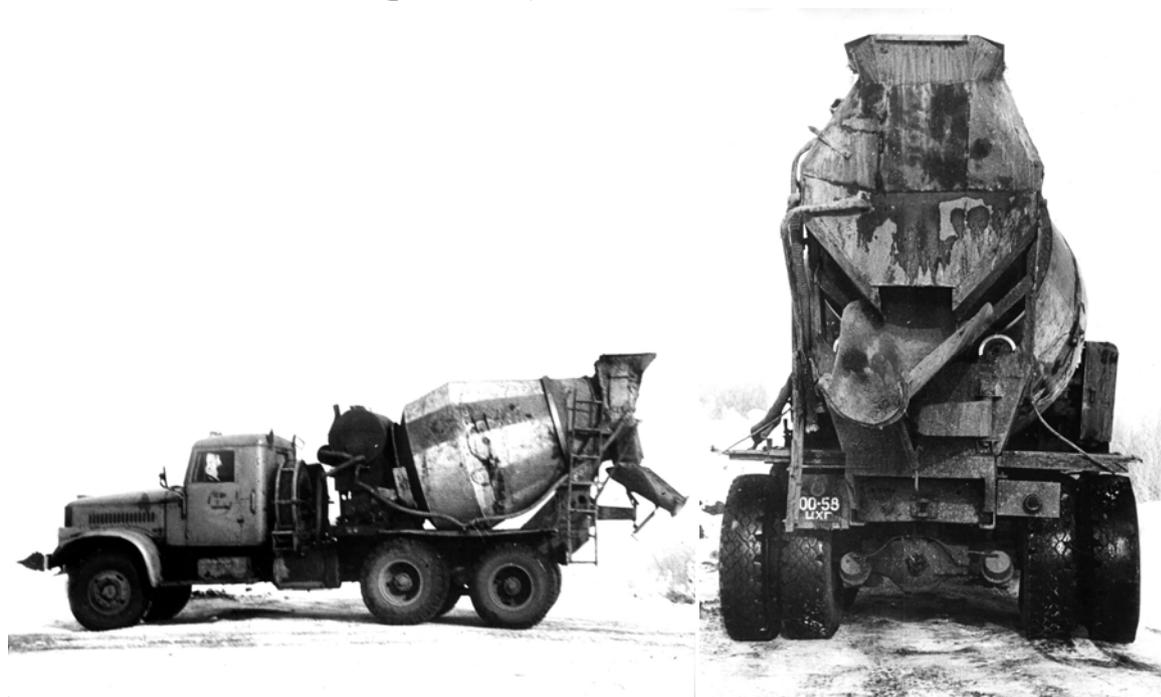


Рис. 7.10. Добоорудование АБС СБ-92 на шасси автомобиля КрАЗ-258 под пароразогрев

АБС загружался отдозированной сухой смесью компонентов бетона из заполнителей естественной влажности, увлажненной и смоченной смесями, а также готовой смесями. Применялась бетонная смесь разных марок – В 7,5, В 15 и В 22,5 – и разных объемов – 1,5, 3 и 3,5 м³ (рис. 7.11).

Пароразогрев бетонной смеси осуществлялся по двум вариантам:

– после загрузки АБС подъезжал к существующему на бетонном узле тепловому пункту, где и производился пароразогрев бетонной смеси из

сухих компонентов с заполнителями естественной влажности или смоченной смеси (рис. 7.11);



Рис. 7.11. Загрузка и пароразогрев компонентов бетонной смеси на бетонном узле

– бетонная смесь из сухих компонентов или увлажненная смесь транспортировались на различные расстояния к строительному объекту, на который первым АБС доставлялся и устанавливался парообразователь Д-563, где и происходило приготовление пароразогретой бетонной смеси (рис. 7.12).



Рис. 7.12. Разогрев компонентов бетонной смеси в АБС паром от парообразователя Д-563

В обоих случаях смесь транспортировалась с вращением смесительного барабана в разных режимах с периодическим замером температуры.

В первом варианте на бетонном узле бетонную смесь разогревали при давлении пара от 0,05 до 0,3 МПа, причем давление пара регулировалось в зависимости от состава, объема, времени разогрева приготавливаемой смеси. Для получения заданного водоцементного отношения смеси в нее вводилась вода совместно с паром или после его подачи. При этом температура воды равнялась температуре смеси или была выше и изменялась от 45 до 75 °С. Полный цикл приготовления пароразогретой смеси не превышал 20 мин, а температура смеси составляла 40 – 60 °С, при этом расход пара на приготовление 1 м³ бетонной смеси изменялся от 30 до 70 кг.

После приготовления горячая бетонная смесь транспортировалась и укладывалась в конструкции разного модуля в течение 1 – 1,5 ч, причем на протяжении всего времени при транспортировании происходило непрерывное или периодическое побуждение бетонной смеси. После прибытия на строительный объект в бетонную смесь вводилась горячая вода, получаемая за счет теплоотдачи выхлопных газов, из водяного бака АБС до получения требуемого водоцементного отношения и увеличения подвижности приготавливаемой смеси. Температуру бетонной смеси контролировали по температурному датчику. Горячая бетонная смесь перегружалась из АБС в металлические бункера с последующей подачей краном или в приемный бункер автобетононасоса БН-80-20 (рис. 7.13), после чего подавалась в бетонируемую конструкцию (рис. 7.14), где утеплялась и выдерживалась методом термоса.



Рис. 7.13. Перегрузка пароразогретой бетонной смеси из АБС в металлический бункер с подачей краном или в приемный бункер АБН



*Рис. 7.14. Бетонирование пароразогретыми смесями
густоармированной конструкции убежища*

Во втором случае парообразователь Д-563 на строительный объект доставлялся первым АБС. Парообразователь представлял собой передвижной трехоборотный горизонтальный котел с жаровой и дымогарными трубами и с водяным экономайзером, выполненным в виде торцовых крышек дымовых коробок, выпускаемый серийно отечественной промышленностью, укомплектованный необходимым вспомогательным оборудованием и арматурой. В машинном отделении был установлен двигатель с раздаточной коробкой, питательный и топливный насосы, вентилятор и форсунка с топливным регулятором. Для контроля уровня воды в котле имелся указатель уровня и два водопроводных крана. Регулирование уровня воды производилось автоматическим регулятором термогидравлического типа. При понижении уровня воды в котле до критического автомат защиты по уровню отключал двигатель.

После первоначального получения пара в парообразователе в течение 15 – 20 мин, он подавался внутрь смесительного барабана АБС, причем давление его регулировалось от 0,05 до 0,8 МПа, а влажность не превышала 5 %. Привод вспомогательных механизмов парообразователя осуществлялся от двигателя внутреннего сгорания, топливом для которого являлась смесь моторного топлива и тракторного керосина в соотношении от 1:1 до 1:3, заливаемая в топливный бак емкостью 320 л. Расход топлива на 1 кг пара не превышал 0,08 кг. Паропродуктивность парообразователя Д-563 составила около 650 – 700 кг/ч, что позволило осуществить непрерывное приготовление пароразогреты бетонной смеси в двух-четырех АБС, обеспечив тем самым достаточный темп бетонирования. Горячая бетонная смесь подавалась в приемный бункер автобетононасоса и перекачи-

ввалась в бетонируемую конструкцию (рис. 7.15), после чего утеплялась и выдерживалась методом термоса до набора бетоном распалубочной прочности.



Рис. 7.15. Бетонирование пароразогретой смесью густоармированной конструкции резервуара

Быстрое приготовление пара, компактность и мобильность парообразователей, а также их достаточно высокая экономичность создали предпосылки их успешного применения вместо стационарных котлов для выполнения бетонных работ. Возможность приготовления горячих смесей на строительном объекте позволила значительно сократить тепловые потери в атмосферу и свести их к минимуму. При приготовлении пароразогретой бетонной смеси в АБС на строительном объекте появилась возможность загрузки его сухой и увлажненной смесями, что позволило в первом случае неограниченно увеличить расстояние транспортирования, а во втором – увеличить его в два-пять раз в сравнении с транспортированием готовой бетонной смеси при одновременном максимально возможном однородном распределении компонентов смеси.

Пароразогрев при совмещении его с приготовлением смеси в АБС технологически проще и для многих случаев практики – технически более доступен и менее безопасен, чем другие способы тепловлажностной обработки бетона.

Контроль температуры бетонной смеси по температурному датчику создал возможность приготовления пароразогретой смеси заданной температуры, повысилось качество приготовляемой смеси за счет более точного получения заданного водоцементного отношения, а подогрев воды вы-

хлопными газами в водяном баке АБС дал возможность увеличения тепла и повышения за счет этого температуры бетонной смеси.

Пароразогрев бетонной смеси в АБС создал возможность расширения области применения метода термоса при бетонировании монолитных бетонных и железобетонных конструкций в зимнее время при одновременном сокращении продолжительности выдерживания конструкций до набора бетоном распалубочной прочности, увеличении числа оборотов опалубки и уменьшении расхода цемента при сохранении физико-механических характеристик бетона; по расходу тепловой энергии – наименее энергоемкий способ тепловой обработки бетонных конструкций при отрицательной температуре наружного воздуха.

§ 7.3. Применение технологии в монолитном домостроении

Начиная с 1986 года технология применяется в гражданском строительстве. Первые производственные испытания технологии проводились при возведении шестнадцатиэтажного сборно-монолитного дома в г. Лобня Московской области. На базе Всесоюзного научно-проектно-строительного объединения «Монолит» отработывались приемы ведения работ с пароразогревом легкогобетонных смесей.

Широкое распространение технология получила, начиная с 1987 года, при возведении многоэтажных жилых зданий из монолитного бетона в Литве, сначала в г. Вильнюсе, а затем и в других городах. Использовался пароразогрев бетонной смеси для получения тяжелого и легкого бетона. Был проведен комплекс исследований целесообразности дополнительного использования широкого спектра добавок, оптимизирующих технологические свойства бетонной смеси и процесс твердения бетона. Было осуществлено проектирование и возведение поста пароразогрева, предназначенного для разогрева бетонной смеси в АБС в больших объемах.

В 1988 году начались комплексные работы по применению технологии трестом «Златоустметаллургстрой» в Челябинской области. Первые рекомендации были реализованы при возведении многоэтажного жилого дома из монолитного бетона в г. Златоусте.

В 1989 году отработывалась технология применительно к условиям возведения детских садов и многоэтажных жилых домов из монолитного бетона в г. Набережные Челны. Для производства легкого и тяжелого бетона, используемого в монолитном домостроении, применялись портланд-

цементы М 400 Катав-Ивановского цементного завода, кварцевый песок, керамзитовый гравий и песок обжиговый керамзитовый производства завода керамзитового гравия г. Набережные Челны.

В 1989 году технология проектировалась для возведения шестнадцатиэтажного жилого дома из монолитного бетона в г. Владимире. Применялись портландцемент либо шлакопортландцемент М 400, песок кварцевый и обжиговый, шунгезитовый гравий, топливные золы и шлаки Владимирской ТЭЦ.

Впоследствии технология нашла широкое применение в России и за ее пределами [210]. Опыт применения пароразогретой в АБС бетонной смеси был и в дорожном строительстве [211]. В последние годы технология применялась при возведении малоэтажных домов из мелкозернистого бетона [212].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бетон по применению вышел на второе место после воды. В связи с этим особую актуальность приобретают работы, раскрывающие теоретические аспекты повышения качества бетонных смесей и бетонов.

Характеристики бетона определяются его структурой. Эволюция понимания структуры как определяющего фактора в разработке высокоэффективных бетонных композитов изменялась с совершенствованием развития методов и подходов, планомерно переходила от макро- через мезо- к микроструктуре и неизбежно дошла до наноструктурного уровня. Сегодня можно определить три основных направления нанотехнологий в бетоне: посредством синтеза вещества, т.е. от нано- к макрокомпозирам; за счет дезинтеграции – от макро- к нановеществу; путем использования в качестве микродобавок для композиционных материалов уже широко используемых и хорошо зарекомендовавших себя наноматериалов различного состава. Проводимые исследования по направленному структурообразованию бетона, включающие все три направления, приводят к результатам, которые на современном этапе можно считать максимальными.

Практическая реализация технологий, базирующихся на фундаментальных законах и принципах синергетики, становится реальностью. Такие технологии, безусловно, относятся к высоким строительным технологиям.

Сегодня можно констатировать тот факт, что технология бетонирования монолитных конструкций пароразогретыми в автобетоносмесителях смесями значительно опередила свое время. Научные принципы, заложенные в основу теоретических разработок, более чем тридцатилетний практический опыт применения технологии доказали реальность объединения и возможность строительного производства совершенствоваться на научных основах.

Последующие шаги в направленном структурообразовании бетона с использованием современных материалов и методов, включая наноматериалы, применительно к уже зарекомендовавшим себя технологиям, к которым относится и технология бетонирования монолитных конструкций пароразогретыми в автобетоносмесителях смесями, позволят поднять строительное производство еще на более высокий уровень.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хаютин, Ю.Г.* Монолитный бетон: (Технология производства работ) : монография / Ю.Г. Хаютин. – М. : Стройиздат, 1981. – 447 с.
2. Бетонные и железобетонные работы : монография / К. И. Башлай [и др.]; под ред. В.Д. Топчия. – М. : Стройиздат, 1987. – 320 с.
3. *Башлай, К.И.* Машины для транспортирования строительных грузов : монография / К.И. Башлай. – М. : Транспорт, 1985. – 173 с.
4. *Слесарев, Ю.М.* Автобетоносмесители на шасси КамАЗ-5511 / Ю.М. Слесарев, С.А. Якушев // Механизация строительства. – 1986. – № 9 (29). – С. 19 – 20.
5. *Они же.* Автобетоносмеситель СБ-159 / Ю.М. Слесарев, С.А. Якушев // Строительные и дорожные машины. – 1984. – № 6 (37). – С. 15 – 16.
6. *Они же.* Отечественные и зарубежные автобетоносмесители: монография / Ю.М. Слесарев, С.А. Якушев. – М. : ЦНИИТЭстроймаш, 1974. – 46 с.
7. Автобетононасосы и автобетоносмесители: каталог. – М. : ПКТИ-промстрой, 2001. – 87 с.
8. *Королев, К.М.* Конструкция и опыт эксплуатации современных бетононасосов : монография / К.М. Королев, С.Ф. Коган. – М. : ЦНИИТЭстроймаш, 1985. – 58 с.
9. *Королев, К.М.* Современные автобетононасосы / К.М. Королев // ЦНИИТЭстроймаш. Обзорная информация. Сер. 1. Строительные машины. – 1990. – Вып. 3. (17) – 49 с.
10. *Он же.* Механизация приготовления и укладки бетонной смеси : монография / К.М. Королев. – М. : Стройиздат, 1986. – 136 с.
11. *Он же.* Оборудование для приготовления и транспортирования бетонных и растворных смесей / К.М. Королев // Бетон и железобетон. – 1986. – № 8 (53). – С. 49.
12. *Гаранин, В.Н.* Новый этап индустриализации строительства : монография / В.Н. Гаранин. – М. : Знание, 1987. – 63 с.
13. *Головнев, С.Г.* Оптимизация методов зимнего бетонирования : монография / С.Г. Головнев. – Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. – 235 с.

14. *Гордон, С.С.* Прогноз долговечности железобетонных конструкций / С.С. Гордон // Бетон и железобетон. – 1992. – № 6 (89). – С. 14.
15. *Горшков, В.С.* Вяжущие, керамика и стеклокристаллические материалы: Структура и свойства : монография / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, А.В. Абакумов. – М. : Стройиздат, 1995. – 576 с. – ISBN 5-274-01912-9.
16. *Колокольникова, Е.И.* Долговечность строительных материалов. (Бетон и железобетон) : монография / Е.И. Колокольникова. – М. : Высш. шк., 1975. – 159 с.
17. *Комохов, П.Г.* Классика и современность бетонов / П.Г. Комохов // Сухие строительные смеси и новые технологии строительства. – 2002. – № 1 (16). – С. 10.
18. *Крылов, Б.А.* Особенности возведения монолитных конструкций при отрицательных температурах / Б.А. Крылов, К.И. Сергеев, В.П. Филатов // Бетон и железобетон. – 1985. – № 3 (46). – С. 4 – 5.
19. *Сергеев, К.И.* Исследование некоторых физических процессов в бетоне монолитных массивных железобетонных конструкций, возводимых при отрицательных температурах: дис. ... канд. техн. наук / К.И. Сергеев. – М., 1973. – 159 с.
20. *Десов, А.Е.* Структура, прочность и деформации бетонов : монография / А.Е. Десов. – М. : Стройиздат, 1966. – 366 с.
21. *Михеев, И.А.* Основы теплопередачи : монография / И.А. Михеев, И.М. Михеев. – М. : Энергия, 1973. – 319 с.
22. *Владимиров, А.П.* Выгрузка и подогрев нерудных строительных материалов в зимних условиях : монография / А.П. Владимиров, Е.В. Браина. – М. : Стройиздат, 1962. – 168 с.
23. *Совалов, И.Г.* Нагревание растворов и бетонов в барабанах мешальных машин / И.Г. Совалов // Строитель. – 1936. - № 1 (1). – С. 28 – 32.
24. *Кузьмин, И.Б.* Технология предварительного пароразогрева бетонной смеси в автобетоносмесителе / И.Б. Кузьмин // Информационный листок № 135 – 82. – Владимир : Владим. межотраслевой территор. центр науч.-техн. информации и пропаганды, 1982. – 3 с.
25. *Рябов, Р.П.* Нагрев бетонной смеси при изготовлении изделий методом горячего формования / Р.П. Рябов // Бетон и железобетон. – 1969. – № 8 (14). – С. 44 – 45.
26. *Гершберг, О.А.* Автоматическое регулирование процесса пароразогрева бетонной смеси в бетоносмесителе свободного перемешивания /

О.А. Гершберг, В.Ф. Афанасьева // Реферативный сборник научно-технической информации Главмосстроя. – 1970. – № 4 (16). – 27 с.

27. *Гершберг, О.А.* Интенсификация твердения бетона в кассетных формах / О.А. Гершберг, Е.В. Сурат, В.Ф. Афанасьева // ВНИИЭСМ. Техническая информация. Сер. «Промышленность сборного железобетона». – 1970. – Вып. 1 (3). – 34 с.

28. *Гершберг, О.А.* Применение пароразогрева смесей в производстве сборного железобетона и бетона / О.А. Гершберг, А.Г. Хабахпашев, В.Ф. Афанасьева. – М. : ВНИИЭСМ, 1972. – 47 с.

29. *Афанасьева, В.Ф.* Изготовление железобетонных изделий из смесей, разогретых паром / В.Ф. Афанасьева, К.Г. Хабахпашев // ВНИИЭСМ. Техническая информация. Сер. «Промышленность сборного железобетона». – 1970. – Вып. 9 (11). – 27 с.

30. *Зубенко, В.М.* Влияние температуры при предварительном пароразогреве на свойства бетонной смеси и затвердевшего бетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.М. Зубенко. – М. : НИИЖБ, 1975. – 23 с.

31. *Зыскин, А.В.* Теплообмен в процессе предварительного разогрева бетонной смеси / А.В. Зыскин // Влияние процессов теплопереноса в бетоне раннего возраста на качество изделий и конструкций. Грозный, 1983. – С. 106 – 113.

32. *Роговенко, В.М.* Интенсификация тепловой обработки бетона за счет совершенствования пароразогрева бетонной смеси : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.М. Роговенко. – Днепропетровск, 1975. – 24 с.

33. *Ребиндер, П.А.* Физико-химическая механика – новая область науки : монография / П.А. Ребиндер. – М. : Знание, 1958. – 62 с.

34. *Он же.* Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика: Избр. тр.: монография / П.А. Ребиндер. – М. : Наука, 1979. – 384 с.

35. Физико-химические аспекты гидратационного твердения вяжущих / П.А. Ребиндер [и др.] // VI Международный конгресс по химии цемента. Т.1. Кн. 2. – М. : Стройиздат, 1976. – С. 27.

36. *Мионов, С.А.* Ускорение твердения бетона : монография / С.А. Мионов, Л.А. Малинина. – М. : Стройиздат, 1964. – 347 с.

37. *Хинт, И.А.* Основы производства силикатных изделий : монография / И.А. Хинт. – М. : Госстройиздат, 1954. – 230 с.

38. *Соломатов, В.И.* Синэргетика композитных материалов : монография / В.И. Соломатов, Л.О. Бабин, В.И. Козомазов. – Липецк : Ориус, 1994. – 153 с.

39. *Афанасьев, А.А.* Возведение зданий и сооружений из монолитного бетона : монография / А.А. Афанасьев. – М. : Стройиздат, 1990. – 55 с.
40. *Афанасьев, А.А.* Технология строительных процессов : монография / А.А. Афанасьев, Н.Н. Данилов, В.Д. Копылов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2000. – 464 с. – ISBN 5-06-003850-5.
41. *Королев, К.М.* Современное бетоносмесительное оборудование и опыт его эксплуатации. Обзорная информация / К.М. Королев. – М. : ЦНИИТЭстроймаш, 1978. – С. 41.
42. *Пригожин, И.Р.* От существующего к возникающему : монография / И.Р. Пригожин. – М. : Наука, 1985. – 327 с.
43. *Пригожин, И.Р.* Порядок из хаоса : монография / И.Р. Пригожин, И. Стенгерс. – М. : Прогресс, 1986. – 431 с.
44. *Будников, П.П.* Химия и технология строительных материалов и керамики : монография / П.П. Будников. – М. : Стройиздат, 1965. – 607 с.
45. *Волженский, А.В.* Минеральные вяжущие вещества : монография / А.В. Волженский. – М. : Стройиздат, 1986. – 464 с.
46. *Шейкин, А.Е.* Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня : монография / А.Е. Шейкин. – М. : Стройиздат, 1974. – 191 с.
47. Исследование и разработка машин для бетонных работ / ВНИИСтройдормаш. Труды института. – М., 1981. – 21 с.
48. *Лермит, Р.* Проблемы технологии бетона : монография / Р. Лермит; пер. с франц. под ред. А.Е. Десова. – М. : Стройиздат, 1959. – 287 с.
49. Руководство по контролю качества бетона / Америк. ин-т бетона; пер. с англ. под ред. В.В. Стольникова. – М. : Госэнергострой, 1963. – 68 с.
50. Walcker and Bloem. Test of Concrete Truck mixer in USA // Cement, Lime and Gravel. – 1953. – Vol. 28. – № 1.
51. Joisel, A. L'Homogenite du beton les betoniers / A. Joisel // Annales de L'Institute Technique du Batiment et les Travaux Publics, 1953. – № 1.
52. Johonsson, A. Forslag till Standart für redovisning och provning av betongblandare / A. Johonsson // Cement och Betong. – 1971, 46. – № 1.
53. Kirchem, R.H. Performance of Plant for mixing plastering concrete. Battelung, Mixing and Handling / R.H. Kirchem // Structural Concrete. – 1962. – vol.1. – № 5.
54. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера. – М. : Стройиздат, 1982. – 313 с.

55. Standart Specification for Ready Mixed Concrete, ASTM Designation: C-69-94.

56. Строительные нормы и правила. Правила производства и приемки работ. Бетонные и железобетонные конструкции монолитные / СНиП III-15-76. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 67 с.

57. Factors affecting the homogeneity of ready mixed Concrete, National Ready Mixed Concrete Association, Maryland, 1970.

58. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон : монография / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М. : Стройиздат, 1971. – 208 с.

59. Калашников, В.П. Влияние режима тепловой обработки на кинетику набора прочности высокопрочного бетона / В.П. Калашников, В.С. Демьянов, Н.М. Дубошин // Изв. вузов. Строительство. – 2000. – № 2 - 3 (124 - 125). – С. 21.

60. Ларионова, З.М. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона : монография / З.М. Ларионова, Л.В. Никитина, В.Р. Гарашин. – М. : Стройиздат, 1974. – 348 с.

61. Лещинский, А.М. Влияние тепловой обработки на степень систематической неоднородности прочности бетона / А.М. Лещинский // Бетон и железобетон. – 1981. – № 8 (30). – С. 15.

62. Горчаков, Г.И. Строительные материалы : монография / Г.И. Горчаков. – М. : Высш. шк., 1981. – 416 с.

63. Комохов, П.Г. Научное обоснование технологии конструкционного бетона как композиционного материала / П.Г. Комохов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002. – № 4 (12). – С. 36.

64. Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих материалов : монография / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. – М. : Высш. шк., 1989. – 383 с.

65. Ларионова, З.М. Формирование структуры цементного камня и бетона : монография / З.М. Ларионова. – М. : Стройиздат, 1971. – 161 с.

66. Невилль, А.М. Свойства бетона : монография / А.М. Невилль. – М. : Стройиздат, 1972. – 344 с.

67. Рамачандран, В.С. Наука о бетоне: Физико-химическое бетоноведение : монография / В.С. Рамачандран. – М. : Стройиздат, 1986. – 278 с.

68. Оценка капиллярно-пористого строения бетона / Г.И. Горчаков [и др.] // Бетон и железобетон. – 1981. – № 5 (27). – С. 7.

69. Калоузек, Г.Л. Процессы гидратации на ранних стадиях твердения цемента / Г.Л. Калоузек // VI Международный конгресс по химии цемента. Т. 2. Кн. 2. – М. : Стройиздат, 1976. – С. 65.

70. *Рыбьев, И.А.* Строительное материаловедение : монография / И.А. Рыбьев. – М. : Высш. шк., 2002. – 701 с. – ISBN 5-06-004059-3.
71. *Шпынова, Л.Г.* Физико-химические основы формирования структуры цементного камня : монография / Л.Г. Шпынова. – Львов: Вища шк., 1981. – 158 с.
72. *Чернявский, В.Л.* Физико-химические исследования гидратации цемента при повышенных температурах / В.Л. Чернявский, А.Г. Ольгинский, В.Г. Савина // Управляемое структурообразование в производстве строительных материалов. – Киев : Будивельник, 1968. – 160 с.
73. *Бутт, Ю.М.* Практикум по технологии вяжущих веществ и изделий из них : монография / Ю.М. Бутт. – М. : Промстройиздат, 1968. – 259 с.
74. *Бутт, Ю.М.* Твердение вяжущих при повышенных температурах : монография / Ю.М. Бутт, Л.Н. Рашкович. – М. : Стройиздат, 1965. – 223 с.
75. *Бутт, Ю.М.* Портландцемент (минералогический и гранулометрические составы, процессы модифицирования и гидратации) : монография / Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев. – М. : Стройиздат, 1974. – 328 с.
76. *Они же.* Практикум по химической технологии вяжущих материалов : монография / Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев. – М. : Высш. шк., 1973. – 504 с.
77. *Бутт, Ю.М.* Технология вяжущих веществ : монография / Ю.М. Бутт [и др.]. – М. : Высш. шк., 1965. – 619 с.
78. *Шестоперов, С.В.* Долговечность бетона : монография / С.В. Шестоперов. – М. : Автотрансиздат, 1955. – 480 с.
79. *Он же.* Долговечность транспортных сооружений : монография / С.В. Шестоперов. – М. : Транспорт, 1966. – 500 с.
80. *Он же.* Технология бетона : монография / С.В. Шестоперов. – М. : Высш. шк., 1977. – 432 с.
81. *Мчедлов-Петросян, О.П.* Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов : монография / О.П. Мчедлов-Петросян. – М. : Стройиздат, 1984. – 225 с.
82. *Он же.* Химия неорганических строительных материалов : монография / О.П. Мчедлов-Петросян. – М. : Стройиздат, 1971. – 224 с.
83. *Он же.* Химия неорганических строительных материалов : монография / О.П. Мчедлов-Петросян. – М. : Стройиздат, 1988. – 303 с.
84. *Мчедлов-Петросян, О.П.* Термодинамика силикатов : монография / О.П. Мчедлов-Петросян, В.И. Бабушкин, Г.М. Матвеев. – М. : Стройиздат, 1972. – 350 с.

85. *Мчедлов-Петросян, О.П.* Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов : монография / О.П. Мчедлов-Петросян, А.В. Ушев-Маршак, А.М. Урженко. – М. : Стройиздат, 1984. – 224 с.
86. *Он же.* Вопросы общей технологии и ускорения твердения бетона : монография / С.А. Миронов. – М. : Стройиздат, 1970. – 223 с.
87. *Он же.* Теория и методы зимнего бетонирования : монография / С.А. Миронов. – М. : Стройиздат, 1975. – 700 с.
88. *Он же.* Применение монолитных железобетонных конструкций в северных условиях / С.А. Миронов [и др.] // Тепло- и массоперенос в процессах твердения материалов на основе вяжущих веществ. – Томск, 1985. – С. 3 – 9.
89. *Ахвердов, И.Н.* Основы физики бетона : монография / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
90. *Кутателадзе, С.С.* Теплоотдача при конденсации и кипении : монография / С.С. Кутателадзе. – М. : Машгиз, 1952. – 225 с.
91. *Чураев, Н.В.* Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах : монография / Н.В. Чураев. – М. : Химия, 1990. – 272 с. – ISBN 5-7245-0577-0.
92. *Курбатова, И.И.* Химия гидратации портландцемента : монография / И.И. Курбатова. – М. : Стройиздат, 1977. – 158 с.
93. *Ларионова, З.М.* Устойчивость этtringита в цементных системах / З.М. Ларионова // VI Международный конгресс по химии цемента. Т. 2. Кн. 1. – М. : Стройиздат, 1976. – С. 168.
94. Структура и конструкционная прочность цементных бетонов : монография / Н.И. Макридин [и др.]. – М. : ВНИИТПИ, 1999. – 156 с.
95. *Рапинов, В.Б.* Химия в строительстве / В.Б. Рапинов, Ф.М. Иванов. – М. : Стройиздат, 1969. – 220 с.
96. *Горчаков, Г.И.* Состав, структура и свойства цементных бетонов : монография / Г.И. Горчаков. – М. : Стройиздат, 1976. – 44 с.
97. *Сычев, М.М.* Твердение вяжущих веществ : монография / М.М. Сычев. – М. : Стройиздат, 1974. – 80 с.
98. *Афанасьева, В.Ф.* Исследование пароразогрева бетонных смесей и его применение в производстве сборного железобетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Ф. Афанасьева. – М.: МИСИ, 1973. – 18 с.
99. *Ахвердов, И.Н.* Высокопрочный бетон : монография / И.Н. Ахвердов. – М. : Госстройиздат, 1963. – 128 с.

100. *Ребиндер, П.А.* Физико-механическая основа эффективного мокрого помола вяжущих материалов / П.А. Ребиндер, Г.И. Логинов // Вестник АН СССР, – 1951. – № 10. – С. 47.

101. Руководство по укладке бетонных смесей бетононасосными установками. – М. : Стройиздат, 1978. – 145 с.

102. Руководство по производству бетонных работ. – М. : Стройиздат, 1975. – 319 с.

103. Руководство по зимнему бетонированию с применением метода термоса. – М. : Стройиздат, 1975. – 191 с.

104. Cold Weather Concreting. – Journal of the American Concrete Institute. 1978. – № 5. P. 72 – 76.

105. *Бужевич, Г.А.* Испарение воды из бетона / Г.А. Бужевич // Сборник научных трудов НИИЖБ Госстроя СССР. – 1967. – Вып. I. – С. 14 – 30.

106. *Заседателев, И.Б.* Теплообмен в камерах твердения периодического действия / И.Б. Заседателев // Бетон и железобетон. – 1959. – № 10 (21). – С. 37 – 39.

107. *Заседателев, И.Б.* Массообмен с внешней средой при твердении бетона в воздушно-сухих условиях / И.Б. Заседателев, Е.И. Богачев // Бетон и железобетон. – 1971. – № 8 (89). – С. 20 – 22.

108. *Дмитрович, А.Д.* Тепло- и массообмен при твердении бетона в паровой среде : монография / А.Д. Дмитрович. – М. : Стройиздат, 1967. – 243 с.

109. *Марьямов, Н.Б.* Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н.Б. Марьямов. – М. : Стройиздат, 1970. – 272 с.

110. *Миронов, С.А.* Основы технологии бетона в условиях сухого и жаркого климата : монография / С.А. Миронов, Е.Н. Малинский. – М. : Стройиздат, 1985. – 316 с.

111. *Штоль, Т.М.* Строительство зданий и сооружений в условиях жаркого климата : монография / Т.М. Штоль, Г.И. Евстратов. – М. : Стройиздат, 1984. – 349 с.

112. *Гныря, А.И.* Испарение влаги в процессе разогрева, укладки и транспортирования бетонной смеси / А.И. Гныря, И.И. Мазур, Г.П. Полянская // Исследования по строительным материалам и изделиям. – Томск, 1981. – С. 22 – 27.

113. *Андрющенков, В.Н.* Исследование процессов тепло- и массообмена и изучение свойств разогретых бетонных смесей при их транспортирова-

нии и укладке: дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Андрющенков. – Киев: НИИСП, 1980. – 241 с.

114. *Березовский, Б.И.* Строительное производство в условиях Севера : монография / Б.И. Березовский. – М. : Стройиздат, 1982. – 183 с.

115. *Красновский, Б.М.* Назначение технологических параметров бетонирования конструкций пароразогретыми в автобетоносмесителе смесями / Б.М. Красновский, Б.В. Генералов, И.Б. Кузьмин // Передовой производственный опыт, рекомендуемый Минсевзапстроем СССР для внедрения в строительстве: НТИС/ОНТИ ПТИ Минсевзапстроя СССР. – М., 1989. – Вып. 13. – С. 14 – 19.

116. *Красновский, Б.М.* О повышении эффективности работы автобетоносмесителей в зимнее время / Б.М. Красновский, И.Б. Кузьмин, В.Н. Черноиваненко // Экспресс-информация. Серия «Организация и технология строительства». – М. : ЦБНТИ Минтяжстроя СССР, 1984, – № 12. – С. 16 – 19.

117. *Кузьмин, И.Б.* Бетонирование монолитных конструкций пароразогретыми смесями / И.Б. Кузьмин // Синэргобетонирование изделий и конструкций. – Владимир: ВлГУ, 1998. – С. 66 – 68.

118. *Ратинов, В.Б.* Добавки в бетон : монография / В.Б. Ратинов, Г.И. Розенберг. – М. : Стройиздат, 1989. – 186 с.

119. Рекомендации по применению специальных химических добавок для управления физико-механическими и технологическими свойствами бетонов и растворов. – ОАО ПКТИпромстрой, 1984. – 28 с.

120. А.с. 600007 В 60Р 3/16 СССР. Автобетоносмеситель / Н.М. Биби-ков, А.И. Елинсон, В.В. Кобзев.

121. *Березовский, Б.И.* Возведение монолитных конструкций зданий и сооружений : монография / Б.И. Березовский, Н.И. Евдокимов, Б.В. Жадановский. – М.: Стройиздат, 1981. – 168 с.

122. А. с. 785080 В 60Р 3/16 СССР. Кузов транспортного средства / В.И. Остромогольский, Б.В. Жадановский, Б.И. Березовский.

123. А. с. 421520 В 28с 5/42 СССР. Автобетоносмеситель / П.Г. Агевич, А.Г. Варушкин, М.И. Глущенко.

124. А. с. 417298 В 28с 5/42 СССР. Бетоносмеситель / Б.А. Дамгаджан, Н.В. Тивелев.

125. А. с. 414117 В 28с 5/42 СССР. Установка для приготовления бетонной смеси / М.И. Глущенко, И.М. Дражендо, М.И. Звинятковский.

126. А. с. 501884 В 28с 5/42 СССР. Установка для приготовления бетонных смесей / В.И. Сорокин, И.М. Дражендо, М.И. Звинятковский.

127. *Красновский, Б.М.* Зимнее бетонирование на индустриальной основе / Б.М. Красновский, И.Б. Кузьмин, С.А. Марков // Бетонирование с непрерывным виброэлектроразогревом смеси. – Владимир: ВПИ, 1985. – С. 88 – 92.

128. *Бурик, М.Я.* Предварительный электроразогрев бетонной смеси в автобетоносмесителе / М.Я. Бурик // Информационный листок № 68 – 86. – Липецк: Липец. межотраслевой территор. центр науч.-техн. информации и пропаганды, 1986. – 3 с.

129. *Кузьмин, И.Б.* Моделирование процесса приготовления пароразогретой бетонной смеси в автобетоносмесителе / И.Б. Кузьмин, Ю.В. Гуров // Повышение эффективности и качества строительства. – Владимир: ВПИ, 1988. – С. 22.

130. *Венюа, М.* Цементы и бетоны в строительстве : монография / М. Венюа. – М. : Стройиздат, 1980. – 415 с.

131. *Десов, А.Е.* Автоматическое регулирование жесткости и подвижности бетонной смеси : монография / А.Е. Десов, К.Н. Ким. – М. : Стройиздат, 1969. – 118 с.

132. *Клюшник, Ю.П.* Пароразогретые бетонные смеси в домостроительном производстве : монография / Ю.П. Клюшник, И.Ф. Соколовский. – М. : Стройиздат, 1975. – 152 с.

133. *Королев, К.М.* Интенсификация приготовления бетонной смеси : монография / К.М. Королев. – М. : Стройиздат, 1976. – 145 с.

134. *Таттерсел, Г.Х.* Бетонная смесь и проблема определения ее удобоукладываемости / Г.Х. Таттерсел // Технология товарной бетонной смеси. – М. : Стройиздат, 1981. – С. 55 – 65.

135. *Анохин, А.И.* Дорожные машины. Основы теории и расчета : монография / А.И. Анохин. – М. : Дориздат, 1950. – 372 с.

136. *Канторович, З.Б.* Машины химической промышленности : монография / З.Б. Канторович. – М. : Машиностроение, 1965. – 413 с.

137. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А.А. Радвеля, А.М. Пономаревой. – Л. : Химия, 1983. – 232 с.

138. *Макевнин, М.П.* Некоторые вопросы расчета машин барабанного типа / М.П. Макевнин // Сборник трудов Московского института химического машиностроения. – М., 1959. – Т. 19. – С. 141 – 158.

139. *Спиваковский, А.О.* Транспортирующие машины : монография / А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. – М. : Машиностроение, 1968. – 502 с.
140. *Ходоров, Е.Н.* Движение материала во вращающихся печах : монография / Е.Н. Ходоров. – М. : Промстройиздат, 1957. – 63 с.
141. *Ахвердов, И.Н.* О режиме движения цементного теста и раствора при перекачивании насосами / И.Н. Ахвердов // Строительная промышленность. – 1952. – № 2 (12). – С. 8 – 10.
142. Руководство по пароразогреву бетонных смесей при производстве сборного железобетона. – М. : Стройиздат, 1978. – 48 с.
143. Wing, S.P. Simplified test for evaluating the effectiveness of concrete mixers / S.P. Wing, V. Jones, R.E. Kennedy. – ASTM. – 1943. – № 3.
144. *Ваганов, А.И.* Продолжительность перемешивания гидротехнического бетона / А.И. Ваганов // Гидротехническое строительство. – 1948. – № 4 (9). – С. 15 – 18.
145. *Бердов, Г.И.* Экспрессионный контроль и управление качеством цементных материалов : монография / Г.И. Бердов, Б.Л. Аронов. – Новосибирск, 1992. – 251 с.
146. *Ратинов, В.Б.* Современные методы исследования цемента, цементного камня и бетона / В.Б. Ратинов, З.М. Ларионова, И.И. Курбатова // Бетон и железобетон. – 1983. – № 9 (40). – С.11.
147. Concrete Manual, Bureau of Reclamation, Sixth Edition, 1955.
148. Kerkham, R.H.H. The Testing of Concrete Mixers / R.H.H. Kerkham. – Engineer. 1953. – V. 195.
149. Recommended Guide Specifications Covering Plant and Accessory Equipment for Ready Mixed Concrete in Constructions for Highways, NRMCA Publication 109. Nat Ready Mix Concrete Assn., 1962.
150. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials, ASTM Special Technical Publication № 169-A. Philadelphia, 1966.
151. Specification for Ready Mixed Concrete, C-94. Book of ASTM Standards. – Part 10. – 1964.
152. *Горохов, В.В.* Неоднородность бетонов и меры для ее устранения / В.В. Горохов // Бетон в гидротехнических сооружениях. – М. : Оргэнергострой, 1957. – С. 16 – 17.
153. *Бродский, В.З.* Введение в факторное планирование эксперимента : монография / В.З. Бродский. – М. : Наука, 1976. – 223 с.
154. Строительные нормы и правила. Правила производства и приемки работ. Бетонные и железобетонные конструкции монолитные. СНиП III-15-76. – М., 1977. – 67 с.

155. *Баженов, Ю.М.* Технология бетона : монография / Ю.М. Баженов. – М.: Высш. шк., 1978. – 462 с.
156. *Миронов, С.А.* Зимнее бетонирование и тепловая обработка бетона : монография / С.А. Миронов. – М.: Стройиздат, 1975. – 162 с.
157. *Киреенко, И.А.* Бетонные, каменные и штукатурные работы на морозе : монография / И.А. Киреенко. – Киев: Госстройиздат УССР, 1962. – 272 с.
158. *Зыскин, А.В.* Технология изготовления изделий из разогретых бетонных смесей : монография / А.В. Зыскин, Е.Н. Булатова. – Киев : Будівельник, 1977. – 147 с.
159. *Глущенко, Л.Ф.* Оптимальные условия пароразогрева бетонной смеси в устройствах непрерывного действия / Л.Ф. Глущенко, Н.Ф. Лисицкий // Бетон и железобетон. – 1983. – № 6 (37). – С. 13 – 14.
160. *Баженов, Ю.М.* Технология бетона : монография / Ю.М. Баженов. – М. : Высш. шк., 1987. – 415 с.
161. *Попов, В.Д.* О теплоотдаче при конденсации пара на горизонтальной поверхности / В.Д. Попов // Сборник трудов КТИПП им. А.И. Микояна. – Киев : КТИПП, 1951. – Вып. 11. – С. 87 – 97.
162. *Жуковский, В.С.* Основы теории теплопередачи : монография / В.С. Жуковский. – Л. : Энергия, 1969. – 224 с.
163. *Эккерт, Э.Р.* Введение в теорию тепло- и массообмена : монография / Э.Р. Эккерт. – Л. : Энергия, 1957. – 280 с.
164. *Киселев, П.Г.* Гидравлика. Основы механики жидкости : монография / П.Г. Киселев. – М. : Энергия, 1980. – 360 с.
165. *Исаченко, В.П.* Теплообмен при конденсации : монография / В.П. Исаченко. – М. : Энергия, 1977. – 240 с.
166. *Лыков, А.В.* Теория теплопроводности : монография / А.В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 597 с.
167. *Стефанов, Е.В.* Вентиляция и кондиционирование воздуха : монография / Е.В. Стефанов. – Л. : ЛВВИСКУ, 1982. – 474 с.
168. *Максимов, Г.А.* Движение воздуха при работе систем вентиляции и отопления : монография / Г.А. Максимов, В.В. Дерюгин. – М. : Стройиздат, 1972. – 96 с.
169. *Гвоздев, А.А.* Температурно-усадочные деформации в массивных бетонных блоках / А.А. Гвоздев // Изв. АН СССР. – 1953. – № 4. – С. 9 – 14.
170. *Горчаков, Г.И.* Коэффициенты температурного расширения и температурные деформации строительных материалов : монография / Г.И. Горчаков, И.И. Лифанов, Л.Н. Терехин. – М. : Изд-во стандартов, 1968. – 166 с.

171. *Епифанов, А.И.* Регулирование термонапряженного состояния бетона при строительстве облегченных плотин / А.И. Епифанов, В.И. Сельницкий. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 102 с.
172. *Заседателев, И.Б.* Теплопроводность твердеющих растворов и бетонов / И.Б. Заседателев, Г.В. Мишин // Бетон и железобетон. – 1969. – № 10 (21). – С. 32 – 35.
173. *Заседателев, И.Б.* Тепло- и массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений : монография / И.Б. Заседателев, В.Г. Петров-Денисов. – М. : Стройиздат, 1973. – 167 с.
174. *Иванов, Г.П.* Термонапряженное состояние монолитных бетонных стен в процессе возведения / Г.П. Иванов // Сборник трудов ЦНИИЭПжилища. – М. : ЦНИИЭПжилища, 1982. – С. 99 – 111.
175. *Исаченко, В.П.* Теплопередача : монография / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 417 с.
176. *Казбек-Казнев, З.А.* Анализ термонапряженного состояния плоских изделий из твердеющего бетона при кратковременных тепловых воздействиях / З.А. Казбек-Казнев // Строительная механика, расчет и конструирование сооружений : сб. науч. тр. Моск. архитектур. ин-та. – 1976. – Вып. 5. – С. 196 – 206.
177. *Паркус, Г.* Неустановившиеся температурные напряжения : монография / Г. Паркус. – М. : Физматгиз, 1963. – 252 с.
178. *Прокопович, И.Е.* Практический способ определения температурно-влажностных напряжений в прямоугольных массивных бетонных блоках / И.Е. Прокопович // Гидротехническое строительство. – 1964. – № 5 (16). – С. 17 – 23.
179. *Фридман, Я.Б.* Прочность и деформация в неравномерных температурных полях : монография / Я.Б. Фридман. – М. : Госатомиздат, 1962. – 256 с.
180. *Теплотехнический справочник: В 2 т. / под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева.* – М. : Энергия, 1976.
181. *Шашков, А.Г.* Методы определения теплопроводности и температуропроводности : монография / А.Г. Шашков, Г.М. Волохов, Т.Н. Абраменко. – М. : Энергия, 1973. – 335 с.
182. *Дьяконов, В.П.* Компьютерная математика : монография / В.П. Дьяконов. – М.: Нолидж, 2001. – 1296 с.
183. *Дэннис, Дж.* Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений : монография / Дж. Дэннис, Р. Шнабель. – М. : Мир, 1988. – 440 с.

184. *Комзин, Б.И.* Исследование температурных напряжений в блоках гидротехнических сооружений, бетонируемых в зимнее время года: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б.И. Комзин. – М. : МИСИ, 1959. – 28 с.
185. *Запорожец, И.Д.* Тепловыделение бетона : монография / И.Д. Запорожец, Д.П. Огороков, А.А. Парийский. – М. : Стройиздат, 1966. – 265 с.
186. *Ушеров-Маршак, А.В.* Оценка вклада экзотермии в энергетический баланс твердения вяжущих и бетонов / А.В. Ушеров-Маршак, Л.А. Першина, П.В. Кривенко // Бетон и железобетон. – 1997. – № 3 (143). – С. 12.
187. *Ицкович, Л.С.* Влагоддача бетона после термообработки / Л.С. Ицкович, М.Т. Солдаткина // Бетон и железобетон. – 1983. – № 11(41). – С. 27.
188. *Лукьянов, В.С.* Обеспечение трещиностойкости однослойных легковесных панелей зданий при их остывании после тепловой обработки / В.С. Лукьянов, А.Р. Соловьянчик // Исследования и методы расчета температурного режима при твердении бетона в изделиях, конструкциях и сооружениях. – М., 1972. – С. 159 – 161.
189. *Лыков, А.В.* Теоретические основы строительной теплофизики : монография / А.В. Лыков. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 519 с.
190. *Он же.* Теория теплопроводности : монография / А.В. Лыков. – М. : Гос. изд-во. техн.-теор. лит., 1952. – 392 с.
191. *Он же.* Тепломассообмен (Справочник): монография / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 560 с.
192. *Он же.* Явления переноса в капиллярно-пористых телах : монография / А.В. Лыков. – М. : Гос. изд-во. техн.-теор. лит., 1954. – 314 с.
193. *Он же.* Методы определения теплопроводности и температуропроводности : монография / А.В. Лыков. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.
194. *Некрасов, К.Д.* Тяжелый бетон в условиях повышенных температур : монография / К.Д. Некрасов, В.В. Жуков, В.Ф. Гуляева. – М. : Стройиздат, 1972. – 128 с.
195. *Никитенко, Н.И.* Теория тепломассообмена : монография / Н.И. Никитенко. – Киев: Наук. думка, 1983. – 351 с.
196. Определение температурных напряжений в железобетонных пролетных строениях на стадии изготовления / В.Б. Зылев [и др.] // Транспортное строительство. – 1977. – № 12 (36). – С. 41 – 42.
197. *Величко, В.П.* Расчет на ЭВМ полей температурных напряжений в элементах транспортных сооружений / В.П. Величко // Сборник трудов ЦНИИС. – 1974. – Вып. 72. – С. 52 – 60.

198. *Кузьмин, И.Б.* Теоретические основы синэргобетонирования пароразогретыми в автобетоносмесителях смесями / И.Б. Кузьмин // Обобщение теории и практики синэргобетонирования. – Владимир : Ред.-издат. комплекс, 2003. – С. 14 – 17.

199. *Красновский, Б.М.* Назначение технологических параметров бетонирования конструкций пароразогретыми в автобетоносмесителе смесями / Б.М. Красновский, Б.В. Генералов, И.Б. Кузьмин // Форсированный разогрев бетонной смеси. – Владимир : Ред.-издат. комплекс, 1989. – С. 105 – 115.

200. *Уткина, Е.А.* Расчет параметров пароразогрева бетонной смеси на ЕС-1020 / Е.А. Уткина, В.В. Тарантова, И.Б. Кузьмин // Совершенствование материалов, конструкций и производства работ в строительстве: сб. ст. – Владимир, 1985. – С. 51.

201. СН 509-78. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – М. : Стройиздат, 1979. – 313 с.

202. *Новикова, Г.И.* Экономическая эффективность пароразогрева бетонной смеси в автобетоносмесителях / Г.И. Новикова, И.В. Тарасова, И.Б. Кузьмин // Совершенствование материалов, конструкций и производства работ в строительстве. – Владимир : ВПИ, 1985. – С. 65 – 66.

203. *Морозова, Т.К.* Расширение области применения пароразогретых в автобетоносмесителях смесей / Т.К. Морозова, И.Б. Кузьмин // Повышение эффективности и качества строительства. – Владимир : ВПИ, 1988. – С. 23.

204. Всесезонная термообработка бетона в монолитном домостроении / А.И. Пижов, И.Б. Кузьмин, Т.К. Морозова, А.С. Мельников // Опыт проектирования и возведения зданий и сооружений из монолитного железобетона с использованием комплексной механизации труда. – Л., 1988. – С. 75 – 79.

205. *Генералов, Б.В.* Обеспечение энергосбережений при бетонировании конструкций горячими смесями / Б.В. Генералов, И.Б. Кузьмин // Снижение энергозатрат в технологии монолитного железобетона для районов с суровыми природно-климатическими условиями. – Иркутск, 1985. – С. 43 – 46.

206. *Кузьмин, И.Б.* Технология бетонирования монолитных конструкций горячими смесями, предварительно пароразогретыми в автобетоносмесителе / И.Б. Кузьмин // Информационный листок № 141-83. – Владимир: Владим. межотраслевой территор. центр науч.-техн. информации и пропаганды, 1983. – 4 с.

207. *Христофоров, А.И.* Расширение возможности применения пластифицирующей добавки С-3 / А.И. Христофоров, И.Б. Кузьмин, Д.И. Кузьмин // Информационная среда вуза : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. Иван. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Иваново: Изд-во ИГАСУ, 2006. – С. 526 – 534.

208. *Кузьмин, И.Б.* Технология зимнего бетонирования предварительно пароразогретыми в автобетоносмесителе бетонными смесями / И.Б. Кузьмин // Информационный листок № 241-83. – Кемерово: Кемер. межотраслевой территор. центр науч.-техн. информации и пропаганды, 1983. – 3 с.

209. *Он же.* Предварительный пароразогрев бетонной смеси в автобетоносмесителе на строительной площадке / И.Б. Кузьмин // Информационный листок № 247-83. – Кемерово: Кемеровский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды, 1983. – 3 с.

210. *Он же.* Практика синэргобетонирования пароразогретыми в автобетоносмесителях смесями / И.Б. Кузьмин // Обобщение теории и практики синэргобетонирования. – Владимир: Ред.-издат. комплекс, 2003. – С. 50 – 52.

211. *Бочков, А.А.* Опыт применения пароразогретыми в автобетоносмесителе бетонной смеси в дорожном строительстве / А.А. Бочков, И.Б. Кузьмин, А.И. Кузнецов // Повышение качества строительства автомобильных дорог в Нечерноземной зоне РСФСР. – Владимир : ВПИ, 1985. – С. 35.

212. *Христофоров, А.И.* Снижение расхода цемента в модифицированных мелкозернистых бетонных смесях / А.И. Христофоров, Д.И. Кузьмин, И.Б. Кузьмин // Строительство и реконструкция. – 2010. – № 3 (29). – С. 70 – 75.

Научное издание

КУЗЬМИН Игорь Борисович

СИНЕРГОБЕТОНИРОВАНИЕ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПАРОРАЗОГРЕТЫМИ В АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЯХ СМЕСЯМИ

Монография

Подписано в печать 13.05.11.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 14,41. Тираж 500 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.