

## ТЕПЛО И МАССООБМЕН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ГЕЛИОТЕРМООБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

### HEAT-MASS EXCHANGE IN THE DIFFERENT TECHNOLOGY SUN-HEAT TREATMENT OF REINFORCED CONCRETE

Н.Т. Даужанов, Л.Б. Аруова

N. Dauzhanov, L. Aruova

Кызылординский государственный университет

*В статье рассмотрены тепло- и массообменные процессы, происходящие в железобетонной конструкции при различных видах тепловой обработки и их влияние на свойства железобетонных конструкций.*

*In the article considered heat-mass exchange in reinforced concrete construction in the different methods of heat treatment and effect on the properties reinforced concrete construction.*

Бетон по своей структуре близко подходит к капиллярно-пористым системам и существующие классические уравнения, описывающие закономерности тепло- и массопереноса, с достаточной степенью точности можно использовать применительно к нему.

Исследуя вопросы внутреннего влагопереноса, А.В. Лыков предложил уравнение массопроводности

$$q_m = - \alpha_m \nabla \theta, \quad (1)$$

где  $\alpha_m$  - коэффициент влагопроводности;  $\nabla \theta$  - градиент потенциала переноса влаги.

А.В. Лыков, П.Д. Лебедев, Г.А. Максимов и В.В. Перегудов показали, что влага в материале движется за счет градиентов, температур и давлений.

Плотность общего потока влаги  $q_m$  - есть сумма плотностей потоков влаги, движущейся в материале за счет этих градиентов:

$$q_m = - a_m p_0 \nabla U \pm a_m \delta p_0 \nabla t^\circ \pm a_p \nabla p \quad (2)$$

где  $a_m$  - коэффициент потенциалопроводности;  $p_0$  - плотность сухого материала;  $\nabla U$  - градиент влагосодержания;  $\nabla t^\circ$  - градиент температур;  $a_p$  - коэффициент переноса влаги за счет градиента давлений;  $\nabla p$  - градиент давлений.

Первый член уравнения  $a_m p_0 \nabla U = q_{mU}$  представляет собой плотность потока влаги, движущейся в материале за счет градиента градиентов  $U$ . Второй член  $a_m \delta p_0 \nabla t^\circ = q_{mt}$  - плотность потока влаги, движущейся в материале за счет градиента температур  $\nabla t$ . А.В.Лыков установил, что наличие градиента температур по сечению материала

приводит к перемещению влаги в материале по направлению теплового потока. Третий член уравнения  $a_p \nabla p = q_{mp}$  выражает плотность движущегося в материале потока влаги за счет градиента давлений  $p$ . Таким образом, выражение (2) является развернутым уравнением внутреннего влагопереноса в материале.

Уравнение внешнего влагопереноса (влагоотдача от поверхности материала в окружающую среду)

$$q_m = - \gamma_m (P_{п.м.} - P_v), \quad (3)$$

где  $\gamma_m$  - коэффициент влагоотдачи, отнесенный к разности выдерживания давлений;  $P_{п.м.}$  - парциальное давление водяных паров над поверхностью материала;  $P_v$  - парциальное давление водяных паров в окружающей среде.

Однако по мере твердения бетона его теплофизические характеристики довольно существенно изменяются и при расчетах это должно учитываться.

Поэтому существующие классические уравнения, описывающие закономерности тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых телах, для твердеющих бетонов оказываются приемлемы только в общих чертах. Закономерности тепло- и массопереноса в бетоне при его тепловой обработке можно разделить на две группы – внутренний тепломассоперенос и внешний тепломассообмен. Причем при исследовании твердения бетонов наибольшее внимание уделялось внешнему массообмену со средой, поскольку с ним связаны потери влаги в окружающую среду, особенно при твердении бетонов в условиях сухого жаркого климата, а также при беспаровых методах тепловой обработки изделий (электротермообработка).

Если обратиться к электротермообработке, то в свежем бетоне разогрев со скоростью свыше  $20^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  приводит к визуально заметным дефектам в виде специфических трещин, количество которых по мере приближения к неопалубленной поверхности возрастает. С увеличением скорости разогрева структурные нарушения проявляются ярче, приводя при скоростях подъема температуры  $80^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  и более к вспучиванию бетона на неопалубленной поверхности и возникновению на ней трещин.

Применение мягких режимов подъема температуры  $2 \dots 5^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  приводит к резкому снижению градиентов температуры по сечению конструкции, что исключает миграцию влаги и увеличение пористости бетона.

При электротермообработке поднимать температуру более чем на  $80^{\circ}\text{C}$  нецелесообразно, т.к. это может привести в ряде случаев к недобору прочности в 28-суточном возрасте, а также к излишним потерям влаги.

При температурах  $60^{\circ}\text{C}$  и выше интенсифицируется внутреннее испарение влаги в капиллярно-пористой системе, приводящее к значительному увеличению содержания паровоздушной смеси в материале, возрастанию внутреннего давления за счет этого разрыхление бетона и понижение его плотности и прочности.

При интенсивном энергетическом воздействии, неравномерность температурного поля в прогреваемых конструкциях специальных высотных сооружениях достигает  $80^{\circ}\text{C}$ . В то же время при малых скоростях подъема температуры, например, в условиях прогрева бетона при воздействии солнечной радиации, температурные перепады не превышают  $14-16^{\circ}\text{C}$ .

Предельно допустимые значения температурных градиентов должны составлять  $0,15^{\circ}\text{C}/\text{см}$ , которые должны обеспечить трещиностойкость конструкций большой массивности.

Большие температурные градиенты приводят не только к неравномерному твердению бетона и приобретению им в процессе тепловой обработки разной прочности,

но и создают термонапряженное состояние, которое обуславливает появление в материале микротрещин, а в отдельных частях конструкций визуально наблюдаемых трещин. Эксперименты, проведенные авторами, показали, что температурные градиенты достигают наибольшей величины в период подъема температуры, и приближается к  $0^{\circ}\text{C}$ , в период изотермического выдерживания. При контактном обогреве в плите толщиной 50 мм через 1 ч после прогрева температурные градиенты достигли  $3,4^{\circ}\text{C}/\text{см}$ , а через 3 ч их величина составила  $1,6^{\circ}\text{C}/\text{см}$ .

При тепловой обработке необходимо стремиться, чтобы градиенты температуры и влажности были минимальными или, во всяком случае, ниже предельных, при которых начинается заметная деструкция бетона. Значения предельных градиентов зависят от прочности структуры бетона к моменту начала нагрева и др. факторов и могут определяться опытным путем.

Анализ приведенных исследований показывает, что при традиционных видах тепловой обработки бетона сходятся на том, что температурные градиенты не должны быть высокими, что предельно допустимые величины скорости подъема температуры не должны превышать  $20^{\circ}\text{C}$  и температуры изотермического прогрева не должны быть более  $60-80^{\circ}\text{C}$ . Такие температурные режимы целесообразно применять при гелиотермообработке для получения бетонов высокого качества.

Один из наиболее простых и эффективных способов ускоренного твердения бетона с использованием солнечной энергии, нашедший довольно широкое практическое применение – тепловая обработка изделий в гелиоформах со светопрозрачным теплоизолирующим покрытием (гелиотермообработка с применением покрытий СВИТАП). Она предусматривает применение гелиоформ, состоящих из двух основных элементов: собственно металлической, деревянной или железобетонной формы и гелиопокрытия СВИТАП. Оно представляет собой конструкцию из нескольких слоев светопрозрачного материала с организованными воздушными прослойками между ними, параметры которого должны обеспечивать, с одной стороны, максимальное использование энергии солнечной радиации для прогрева бетона, с другой – аккумулялирование тепла в изделии на несолнечное время суток. Для эффективной реализации такой гелиотермообработки потребовалось создание герметизированной воздушной прослойки определенных размеров между гелиопокрытием и свежеложенным бетоном, параметры которой определяются как с позиций формирования физической структуры бетона, так и теплофизическими соображениями. При организации воздушной прослойки над свежеложенным бетоном создается замкнутая среда, полностью насыщаемая в процессе гелиотермообработки водяными парами и обеспечивающая поэтому благоприятные условия твердения бетона, характеризующиеся высокой относительной влажностью. Такая среда создается за счет частичного испарения влаги из бетона (до 4-5% воды затворения). Создание воздушной прослойки на поверхности свежеложенного бетона обеспечивает: сохранение оптических характеристик применяемых светопрозрачных материалов из-за отсутствия контакта с поверхностью свежеложенного бетона; более полное проявление «парникового эффекта» применяемых светопрозрачных материалов за счет многослойности конструкции; дополнительную тепловую изоляцию покрытия, которая способствует повышению температуры поверхности бетона, а в период действия солнечной радиации – снижению темпа остывания изделий ночью; значительное повышение долговечности светопрозрачных материалов, удлинение периода их эксплуатации и создание качественной поверхности изготавливаемого изделия. При твердении изделий на полигоне поток солнечной радиации в дневное время проходит через несколько слоев светопрозрачного материала гелиопокрытия, поступает к

поверхности изделия и разогревает его. При этом необходимо отметить, что незащищенный бетон тоже воспринимает солнечную радиацию, однако постоянный теплообмен с его поверхности и охлаждение вследствие испарения не позволяют ему эффективно прогреваться.

Твердеющее изделие – это одновременно поглощающий и теплоаккумулирующий элемент гелиоприемника. Способствовать аккумуляции тепла в изделии будет тоже гелиопокрытие, которое благодаря воздушным прослойкам и суммарному парниковому эффекту всех слоев полимерных материалов уже выполняет роль теплоизоляционного покрытия.

Поэтому применение гелиоформ со СВИТАП обеспечивает прежде всего блокирование интенсивных процессов внешнего массообмена и пластической усадки в твердеющем бетоне, служит надежным средством ухода за бетоном не только в условиях солнечной радиации, но и вообще при экстремальных параметрах окружающей среды, характерных для сухого жаркого климата. Показателем полного насыщения влагой воздушного зазора между поверхностью изделия и покрытием СВИТАП является образование на нижней поверхности покрытия капель конденсата, свидетельствующее о достижении близкой к 100% относительной влажности воздуха в зазоре и нейтрализации негативных физических процессов в прогреваемом бетоне [1].

Наиболее ответственным является выбор размера воздушного зазора между поверхностью бетона и нижним слоем покрытия. Помимо процесса теплообмена, на который влияет толщина зазора, в этом воздушном объеме покрытия происходит интенсивный массообмен – испарение влаги из твердеющего бетона. Количество испаряемой воды зависит от размера зазора и температуры воздуха. Так, например, при зазоре толщиной 0,5 м в него при 50 °С испаряется из твердеющего бетона примерно 40 % воды затворения, что приводит к нарушениям структуры бетона и потере в месячном возрасте примерно 50 % прочности. Вследствие этого в зависимости от толщины изделия, вида бетона и конструкции гелиокрышки специально рассчитывают и указывают в проекте оптимальные размеры воздушных зазоров в гелиопокрытиях. Зазор может быть 20-30 мм (увеличение толщины воздушной прослойки приводит к интенсификации протекания физических процессов и может вызвать деструкцию поверхностного слоя бетона, снижающую его прочность). Соприкосновение нижнего слоя гелиокрышки с поверхностью изделия не допускается, так как при этом происходит быстрый выход из строя светопрозрачного материала и значительно снижается интенсивность нарастания прочности бетона.

Анализ температурных кривых различных изделий показывает, что прогрев их в гелиоформах, осуществляется по мягким режимам с подъемом температуры в бетоне до 65-70°С 5-7 ч, с условной изотермической выдержкой в течение 5-7 часов и медленным остыванием со скоростью 1,5-2,5 °С/ч до 35-50°С. Температурные градиенты по сечению изделий под СВИТАП на стадии условной изотермической выдержки составили 0,5-1,06°С/см.

При электрообогреве бетона различными электро-нагревательными устройствами (ТЭНы, коаксиальные нагреватели) по мягким режимам под СВИТАП на стадии условной изотермической выдержки в зависимости от температуры среды температурные градиенты составляют 0,7-1,1°С/см, в то время как в открытых изделиях 2,4-3,2°С/см. Это происходит в связи с тем, что в начале процесса доминирующей становится термическая диффузия влаги, по сравнению с концентрационной диффузией вследствие более быстрого развития температурного поля по сравнению с полем влагосодержания. Термическая миграция влаги во внутренние слои бетона способствует

возникновению градиента влагосодержания, благодаря чему влаготок меняет направление на противоположное и жидкая фаза начинает двигаться к облучаемой поверхности. При открытой облучаемой поверхности обогреваемого бетона происходит испарение влаги в окружающую среду, которое возрастает с увеличением градиента влагосодержания по мере обезвоживания поверхностного слоя. В связи с изложенным, при электрообогреве большое внимание следует обращать на предохранение бетона от потерь влаги. Поэтому применение вододисперсионных пленкообразующих составов при электрообогреве является не только благоприятным, но и обязательной необходимостью для получения бетонных изделий высокого качества.

Рассмотрим некоторые закономерности массопереноса применительно к бетону при комбинированной гелиотермообработке с использованием пленкообразующих составов (греющие шнуры, сетчатые нагреватели) и гелиотермообработке в светопрозрачных камерах с применением пленкообразующих составов.

Гелиотермообработка в светопрозрачных камерах в значительной мере предотвращает интенсивное обезвоживание бетона, что не приводит к деструктивным процессам, но влияет на тепловой баланс гелиоформы и требует учета вследствие использования одностороннего потока солнечной радиации естественной концентрации, характеризующегося нестационарностью во времени. Помимо этого, в этих камерах в результате различий в теплоемкости и поглощательной способности бетона и светопрозрачного материала возникает температурная разница между поверхностью более нагреваемого изделия и покрытием. Это приводит к конденсации влаги на обращенном к поверхности изделия светопрозрачном материале, что ухудшает его оптические характеристики. Одна из особенностей в развитии массообменных процессов состоит в том, что на стадии радиационного нагрева изделия процессы испарения и конденсатообразования влаги затухают через 1-2 ч после установления светопрозрачных камер. К этому приводит процесс конденсатообразования, так как пленка воды увеличивает поглощательную способность светопрозрачного материала и его температуру до значений, близких к температуре поверхности изделий. Другой особенностью является возобновление конденсатообразования в вечернее время, после прекращения действия солнца. Скорость водопотерь из бетона и эффект от испарения при охлаждении при этом в 2-2,5 раза выше, чем при нагреве изделия.

При гелиопрогреве с использованием пленкообразующих составов испарение влаги при формировании температурного поля изделия особенно влияет на стадию нагрева бетона. Здесь температурные градиенты также невелики  $0,4-1,04^{\circ}\text{C}/\text{см}$ , но наибольшие влаготери происходят именно при нагреве изделия, когда одновременно идет процесс полимеризации нанесенного на его поверхность состава и образуемая им пленка еще не приобрела полностью изолирующие свойства. Кроме того, при гелиопрогреве с использованием только пленкообразующего состава влаготери бетона зависят и от подвижности окружающей среды (ветер), так как в отличие от светопрозрачных камер изделие через неопалубленные поверхности контактирует с наружным воздухом.

Таким образом, интенсивные массообменные процессы при использовании тепловой обработки для интенсификации твердения бетонных изделий приводят к быстрому испарению влаги с неопалубленных поверхностей, что существенно нарушает формирующуюся структуру бетона и ухудшает его основные физико-механические свойства. Поэтому при использовании электрообогрева необходимо защищать поверхность свежеуложенного бетона от интенсивного испарения влаги с помощью вододисперсионных пленкообразующих составов, которые не препятствуют подаче тепла бетону и

плотно прилегают к его поверхности. Если свежетоформованные бетонные изделия после нанесения пленкообразующих составов помещать в светопрозрачные камеры из полимерных материалов, то при использовании солнечной энергии для термообработки бетона, это даст возможность почти полностью блокировать интенсивные процессы внешнего массообмена в твердеющем бетоне в условиях, характерных для сухого жаркого климата [2, 3].

При тепловой обработке надо стремиться, чтобы градиенты температуры и влажности были минимальными или ниже предельных, при которых начинается заметная деструкция бетона. Значения предельных градиентов зависят от зрелости структуры бетона к моменту начала нагрева и других факторов и могут определяться опытным путем, при апробированных способах гелиотермообработки они могут достигать 0,4-1,04<sup>0</sup>С/см и при комбинированных методах гелиотермообработки 0,7-1,1<sup>0</sup>С/см.

Выявленные закономерности тепло- и массопереноса при различных способах гелиотермообработки бетона позволяют более грамотно подходить к назначению ее параметров и выдерживания отформованных конструкций до приобретения требуемой прочности. Выявлены характеры внешнего массообмена в процессе различных способов гелиотермообработки, показана роль различных технологических параметров.

#### *Литература*

1. Крылов Б.А., Заседателев И.Б., Малинский Е.Н. Изготовление сборного железобетона с применением гелиоформ // Бетон и железобетон, 1984, №3. С.17-18.
2. Крылов Б.А., Чукуаселидзе Л.Г., Топильский Г.В., Рыбасов В.П. Вододисперсионные пленкообразующие составы для бетона в условиях сухого жаркого климата // Бетон и железобетон. 1992, №6. С.15.
3. Крылов Б.А., Звездов А.И. Влияние температуры на его структуру и твердение / Международный симпозиум в Японии E&FN Spook. 1995, Wolum Two, 917-925 с.

#### *The literature*

1. Krylov Boris A, Zasedatelev I. B., Malinski E. N. Production of reinforced concrete construction with solar form // Concrete and reinforced concrete construction, 1984, №3. С.17-18.
2. Krylov Boris A., Chkuaselidze L.G., Topilski G.V., Rybasov V.P. Water dispersive composition for concrete in condition dry and hot climate // Concrete and reinforced concrete construction. 1992, №6. С.15.
3. Krylov B.A. and Zvezdov A.I. Temperature Influence on Concrete Structures and Its Hardening / International Symposium in Japan E&FN Spook. 1995, Wolum Two, 917-925 p.

*Ключевые слова: тепловая обработка, тепло- массообмен, железобетонная конструкция, градиент*

*Key word: heat treatment, reinforced concrete, heat-mass exchange*

Почтовый адрес: Казахстан, г. Кызылорда, ул. Хан, 29  
Телефон 8 7242 2365 09, факс 8 7242 27 81 94  
e-mail: [ecoeducation@mail.ru](mailto:ecoeducation@mail.ru)

*Рецензент: Байтасов К.Б., к.т.н., доц., зав. каф. «Архитектура и строительное производство» Кызылординского государственного университета*