

Министерство высшего и среднего специального  
образования БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

М.Т.СОЛДАТКИН

кандидат технических наук, доцент

ПРОБЛЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ЗАДАННОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ  
МАТЕРИАЛА ПАНЕЛЕЙ НАРУЖНЫХ СТЕН ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ  
(05.484. Строительные материалы, детали и изделия)

Напечатано на русском языке

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

М и н с к 1 9 7 2

Работа выполнена на кафедре "Строительная физика и использование тепла в строительном производстве" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института и на заводах ЖБК ДСК-1 г. Минска и треста "Строймонтажиндустрия" МС БССР.

Официальные оппоненты:

Член-корреспондент АН БССР, доктор технических наук, профессор Смольский Б.М.

Доктор технических наук, профессор Горчаков Г.И.

Доктор технических наук Крылов Б.А.

Ведущее предприятие - ВНИИ заводской технологии железобетонных конструкций МСМ СССР, Москва.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ февраля 1972 года.

Защита диссертации состоится в марте 1972 г. на заседании Совета по присуждению ученых степеней по строительным, гидротехническим, химикотехнологическим специальностям и строительству коммунальных сооружений при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Просим Вас прислать отзыв в 2-х экземплярах, заверенный печатью, по адресу:

г. Минск, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт, Ученому секретарю Совета.

Дата защиты будет объявлена в газете "Вечерний Минск"

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.

Ученый секретарь Совета  
кандидат технических наук, доцент

И.С. КАЧАН

Как известно, с переходом к индустриальному методу изготовления панелей наружных стен жилых зданий и сокращением сроков строительства влагосодержание наружных стен не уменьшается, а наоборот, в некоторых случаях даже повышается. Это можно объяснить тем, что количество влаги, вносимой при заводском изготовлении панелей, увеличивается в несколько раз. Таким образом, влагосодержание материала становится одним из важнейших критериев, определяющих заводскую готовность панелей, сроки строительства и санитарно-гигиенические условия в помещениях зданий. Поэтому снижение остаточного производственного влагосодержания материала панелей наружных стен - первоочередная задача жилищного строительства в нашей стране.

Особенно большие резервы по снижению влагосодержания и себестоимости стеновых панелей заложены в процессах тепловой обработки

В настоящее время большинство заводов по производству крупнопанельного домостроения для тепловой обработки бетонов в качестве теплоносителя применяют насыщенный водяной пар. На лучших предприятиях продолжительность цикла тепловой обработки составляет 8-12 часов, расход пара 200-300 кг/м<sup>3</sup> изделий, а отпускное влагосодержание материала керамзитобетонных панелей иногда достигает 15-22%, что значительно превышает равновесную.

В последние годы для тепловой обработки изделий начали применять электрическую энергию, что позволило сократить продолжительность обработки, снизить влагосодержание материала панелей и их себестоимость. Но имеющиеся способы тепловой обработки с применением электрической энергии имеют недостатки и очень часто дают противоречивые результаты, которые не позволяют получать изделия с заранее заданными физико-механическими качествами, в том числе с заданным влагосодержанием.

Диссертационная работа представляет собой обобщение результатов теоретических и лабораторных исследований и производственных экспериментов, проведенных автором или под его руководством аспирантами и соискателями в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте и на предприятиях комбината

"Строймонтажиндустрия" и ДСК № I г. Минска.

Диссертация состоит из введения и двух разделов, связанных общей идеей обеспечения заданного влагосодержания материала наружных стеновых панелей в процессе их заводского изготовления.

Первый раздел работы состоит из трех глав и посвящен обзору основных направлений конструктивных решений панелей наружных стен жилых зданий и анализу влияния влагосодержания на их тепловлажностное состояние.

Во втором разделе, состоящем из четырех глав, изложены вопросы выбора метода измерения и динамики влагосодержания материала панелей при их заводском изготовлении, а также дан анализ технико-экономических показателей уменьшения остаточного влагосодержания материала панелей и внедрения тепловой обработки в установках с теплоизлучающими поверхностями.

### Глава I. Основные направления конструктивных решений панелей наружных стен жилых зданий и требуемые теплотехнические качества, предъявляемые к ним.

Идея создания крупноразмерных элементов в нашей стране возникла еще в 30-е годы, а начало разработки научных основ проектирования сборных жилых домов из железобетонных панелей относится к 1940 г.

В 1946 г. в Институте строительной техники Академии архитектуры СССР под руководством Г.Ф. Кузнецова начали проводиться систематические теоретические и экспериментальные исследования в области строительства крупнопанельных многоэтажных жилых зданий (Б.Н. Смирнов, Н.В. Морозов, Т.П. Антипов, Ф.В. Ушков, В.Н. Никольский и др.).

В период 1946-1954 гг. разработаны первые принципиальные решения панелей и проведены теплотехнические и прочностные исследования на натуральных образцах, что дало возможность уже в 1947 г. в Москве построить первый многоэтажный каркасно-панельный, а в 1949-1951 гг. - бескаркасный крупнопанельный дом в Магнитогорске. Были доказаны техническая возможность и экономическая эффективность крупнопанельного метода возведения жилых зданий любой этажности. Поэтому уже к концу истекшей пятилетки (1966-1970 гг.) доля крупнопанельного строительства составила около 40%, а к концу текущей пятилетки (1971-1975 гг.) она будет не менее 50% всего объема жилищного строительства в среднем по стране.

Анализ современного крупнопанельного домостроения показывает, что в ближайшие 10-15 лет наиболее широкое распространение получат панели размером на две комнаты и высотой на этаж трехслойной конструкции из тяжелого или легкого бетонов с утепляющим слоем, преимущественно из минераловатных плит на фенольной основе, и однослойные легкобетонные на пористых заполнителях.

Проектирование и строительство крупнопанельных каркасных и бескаркасных жилых зданий основано на применении ограждающих конструкций, обладающих хорошей тепло- и звукоизоляционной способностью, достаточной прочностью и долговечностью. Этим требованиям наиболее полно отвечают однослойные панели из легких бетонов.

Уже к концу 1967 г. домостроительные предприятия выпускали около 60% однослойных панелей, в основном из керамзитобетона и ячеистого бетона, и только около 40% - многослойных.

Начало фундаментальных исследований тепловлажностных, технологических и прочностных качеств ограждающих конструкций из легких бетонов относится к 1951 г., когда Г.Ф.Кузнецов, Ф.В.Ушков, Н.В.Морозов, Н.Я.Спивак, Ю.Б.Монфред, Б.Н.Смирнов и другие начали исследовать в лабораториях бывшего Института строительной техники, НИИЖБа, ЦНИИПСе однослойные панели из легких бетонов на пористых заполнителях (шлаке керамзита, шлаковой пемзы и термозита).

Следует еще раз отметить, что ограждающие конструкции из легких бетонов совмещают функции несущего элемента и утеплителя, их применение снижает трудоемкость производственных процессов, а в ряде случаев они легче аналогичных конструкций из обычного бетона. Преимущества легких бетонов выявляются, если даже стоимость пористых заполнителей по сравнению с обычными более высокая.

В нашей стране и за рубежом в качестве пористых заполнителей применяют как природные, так и искусственные материалы. К концу 1980 г. производство последних предполагается довести до 50 млн.м<sup>3</sup>.

В балансе искусственных пористых заполнителей наибольший удельный вес составляет керамзит. Керамзиту отдают предпочтение и за рубежом. Панели стен из керамзитобетона, по данным НИИ керамзита, снижают стоимость 1 м<sup>2</sup> жилой площади на 10 руб. Поэтому уже в 1968 г. доля керамзитобетона в наружных стенах крупнопанельных жилых домов составила 52 и крупноблочных - 95%.

При современных достижениях строительной науки и техники здания по условиям прочности и устойчивости можно строить в 4-5 этажей с наружными стенами толщиной в 1/2 кирпича или 4-6 см из железобетона. Но такие стены не отвечают теплотехническим требованиям: они промерзали бы в зимнее время, а в летнее - способствовали бы перегреву помещений за счет инсоляции.

Поэтому наружные стеновые конструкции отапливаемых зданий, в том числе и жилых, должны обладать определенными теплотехническими качествами, характеризующимися общим термическим сопротивлением ( $R_0$  м<sup>2</sup>·град/вт), коэффициентом теплоустойчивости ( $\psi$ ) и разностью температур воздуха помещений и внутренней поверхности стены ( $t_g - \tau_g = \Delta t$ ), нормативные величины которых вычислены нами для многих городов, расположенных в различных климатических зонах страны и даны в Приложениях к диссертации.

Одним из важнейших назначений ограждающих конструкций, при принятой системах отопления и вентиляции, является поддержание в помещениях комфортных условий микроклимата, которые обеспечили бы нормальные условия теплообмена между телом человека и окружающей средой и избежание конденсации водяных паров на внутренней поверхности стены.

Опыт эксплуатации жилых зданий показывает, что температура воздуха помещений колеблется по сравнению с расчетной при постоянном влагосодержании ( $d$ ) воздуха. Это приводит к изменению температуры точки росы и внутренней поверхности ограждений, а также разности температур воздуха помещения и внутренней поверхности наружной стены. Получается достаточно сложная зависимость. Учитывая последнее, Ф.В.Ушков для упрощения оценки условий выпадения конденсата предложил вместо температуры точки росы ( $\tau_p$ ) принимать разность температур воздуха помещений и точки росы и ввел понятие относительной разности температур воздуха помещений и точки росы, величина которой для  $t_g = 14+26^{\circ}\text{C}$  подсчитана автором и приведена в диссертации.

Следует отметить, что с увеличением температуры внутреннего воздуха оптимальный температурный перепад увеличивается быстрее, чем разность температур воздуха и точки росы; при этом расчетные условия ( $t_g = 18^{\circ}$  и  $\varphi_g = 60\%$ ) обеспечивают надежность для температур воздуха, меньших  $18^{\circ}\text{C}$ . Но необходимо помнить, что в жилых

зданиях в основном  $t_{\theta} > 18^{\circ}\text{C}$  при постоянном влагосодержании воздуха, т.е. при одинаковой  $\tau_p$ . Поэтому при повышении  $t_{\theta}$  всегда следует проверять условия конденсации.

## Глава 2. Влияние влагосодержания материала панелей наружных стен жилых зданий на их тепловлажностные качества.

В натуральных условиях эксплуатации отапливаемых зданий в зимний период температура материала стены падает от положительной до отрицательной, величины которых зависят от параметров внутреннего и наружного воздуха и тепловлажностных качеств ограждения. Поэтому в зимний период влага в материале ограждения может быть как в парообразном, так и в твердом состоянии (иней, снег, лед). При этом, чем ниже температура, тем большая часть ее будет замерзать.

В диссертации произведен анализ причин и условий замерзания воды в порах и капиллярах строительных материалов, в которых она замерзает при  $t < 0^{\circ}\text{C}$ , и, чем меньше размер пор и диаметр капилляров, тем ниже температура замерзания воды.

В наружных ограждающих конструкциях отапливаемых зданий температура по сечению ограждения падает постепенно и трудно установить, сколько замерзает воды в каждом сечении ограждения и в каком состоянии находится образовавшийся лед. Этот вопрос, на наш взгляд, очень сложный и требует особых тщательных и продолжительных теоретических и экспериментальных исследований.

Одной из важнейших характеристик, определяющих величину термического сопротивления наружного ограждения ( $R_0$ ), является коэффициент теплопроводности материала слоев, который зависит от их структуры, объемной массы, температуры и влажности.

Как известно, коэффициент теплопроводности имеет прямо пропорциональную зависимость от объемной массы материала, которая в свою очередь зависит от его состава, структуры, пористости, а для бетонов еще от фракционного содержания заполнителей. С увеличением пористости объемная масса и коэффициент теплопроводности уменьшаются. Но общая пористость и объемная масса, хотя и являются определяющими факторами, не могут полностью описать  $\lambda = f(T)$ , так как при одном и том же их значении характер по-будет различен. С увеличением количества мелких пор и капилляров коэффициент теплопроводности уменьшается. Таким образом,  $\lambda = f(T)$  математически одним уравнением описать невозможно даже для одного и того же вида материала. Вследствие этого многие

исследователи (Н.Я.Спивак, В.Барбу, Я.Ш.Штейн, Н.А.Тачкова, Г.А. Бужевич, В.А.Дорф, И.Я.Неусихин и др.) динамику коэффициента теплопроводности материалов от их объемной массы выявляли экспериментально и представляли математическими выражениями, написанными для конкретных материалов и условий эксперимента, и в виде графиков.

Как известно, для всех строительных и теплоизоляционных материалов влияние колебания температуры на величину коэффициента теплопроводности заметно только в больших пределах. Исследования Ф.В.Ушкова, И.С.Каммерера, Л.Ф.Янкелева, Н.А.Тачковой, Т.Ф.Таганцевой, Ю.Г.Бурова, А.Н.Крашеникова, А.У.Франчука и многих других показали, что при сорбционной влажности материала ограждающих конструкций оно незначительно.

В соответствии с вышеизложенным в зимний период в порах материала в различных сечениях наружного ограждения в данный момент времени одновременно могут находиться влажный воздух, вода, лед и иней.

Как известно, коэффициенты теплопроводности воздуха и воды резко отличаются: например, для температур от 0 до 30°C воздух имеет  $\lambda = 0,024-0,027$ , а вода -  $0,55-0,62$  вт/м·град, т.е. в 23 раза больше. Коэффициент теплопроводности воды в твердом виде зависит от его структурного состояния и объемной массы и колеблется от 0,1-0,12 для инея,  $0,023+0,636$  - снега и до 2,3 вт/м·град - твердого льда. Это различие коэффициентов теплопроводности сред, заполняющих капилляры и поры материала, определяет динамику коэффициента теплопроводности последнего при различной степени увлажнения и различных температурах, так как передача тепла в капиллярно-пористых телах в основном происходит путем молекулярной теплопроводности через скелет тела и внутриспоровое связанное вещество.

Результаты исследований многих авторов показали значительное возрастание коэффициента теплопроводности материала легких бетонов с увеличением их влагосодержания как при положительных, так и при отрицательных температурах.

Так, по данным Ю.Г.Бурова и Т.Ф.Таганцевой, коэффициент теплопроводности пенобетона и пенозолобетона с  $\gamma = 800$  кг/м<sup>3</sup> при изменении их влажности от 1,4 до 23-25% при  $t = \pm 10^\circ\text{C}$  увеличивается в два раза, при  $t = \pm 50^\circ\text{C}$  - в 2,5 раза, а газозолобетона - еще больше; интенсивность изменения теплопроводности почти одина-

нова во всем диапазоне рассматриваемых температур. Для газосиликата и пеносиликата с  $\gamma = 700 \text{ кг/м}^3$  она с удалением от  $0^\circ\text{C}$  уменьшается и при  $t = \pm 30^\circ\text{C}$  переходит почти в прямую линию.

По данным А.У.Франчука, А.С.Эпштейна и Е.Н.Борисовой, Н.Я. Спивака, Ф.В.Ушкова, И.Н.Умнякова, Н.В.Морозова и др., коэффициент теплопроводности конструктивно-теплоизоляционного и конструктивно-керамзитобетонных с изменением их влажности от 0 до 20% увеличивается примерно в 1,5 раза, а интенсивность его изменения возрастает с повышением влажности.

В литературе имеются различные точки зрения на зависимость коэффициента теплопроводности материалов от их влажности при отрицательных температурах. Одни авторы утверждают, что у влажных материалов при отрицательных температурах он больше, чем при положительных, а другие, наоборот, меньше.

Ф.В.Ушков уменьшение теплопроводности влажных бетонов на пористых заполнителях объясняет образование в порах инея, у которого коэффициент теплопроводности меньше, чем у воды и льда.

Н.В.Пак, исследуя зависимость коэффициентов теплопроводности кирпича и газоволокнабетона от их влагосодержания при отрицательных и положительных температурах, подтвердил выводы Ф.В.Ушкова. По его мнению, относительное уменьшение теплопроводности материалов может быть объяснено фазовым состоянием воды и особенностями процесса ее замерзания в порах материала. При влажности меньшей, чем содержание незамерзшей воды при данной отрицательной температуре, влага не превращается в лед или иней, а, следовательно, теплопроводность материала не может быть больше, чем при положительной температуре, а, наоборот, меньше, так как она с уменьшением  $t$  уменьшается. Он утверждает, что до тех пор, пока растущие кристаллы льда не заполнят полностью сечение крупных пор вследствие "обезвоживания" мелких, теплопроводность материала при отрицательной температуре будет меньше, чем при положительной. При полном заполнении льдом пор образуются "мостики холода", теплопроводность материала резко возрастает и становится больше, чем при положительной температуре.

Анализ литературных данных показывает, что большинство результатов экспериментальных исследований зависимостей коэффициента теплопроводности влажных строительных материалов  $\lambda = f(T)$ ,  $\lambda = f(t)$  и  $\lambda = f(W)$  представлены в виде графиков и таблиц, но очень мало имеют

об формул, выражающих эти зависимости. Таким образом, отдельные выражения или графики не связаны между собой, что затрудняет получение действительной величины  $\lambda$  материала. Кроме того, при выполнении последовательных расчетов по различным формулам и графикам неизбежно возникновение сравнительно большой ошибки, искажающей действительную величину коэффициента теплопроводности.

Нами обработаны зависимости  $\lambda = f(T)$ ,  $\lambda = f(t)$  и  $\lambda = f(w)$ , полученные многими исследователями и предложена формула вида

$$\lambda = 0,00051 \gamma (1 + 0,0025 t) + k w_0^{2/3} - 0,00054 t - 0,215, \quad (I)$$

где  $\gamma$  - объемная масса материала в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  - температура, °C;

$w_0$  - объемное влагосодержание материала в долях единицы;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала при данных  $\gamma, t$  и  $w_0$ , Вт/м·град;

$k$  - коэффициент, принимаемый для  $t > 0^\circ\text{C}$  при любой влажности и для  $t < 0^\circ\text{C}$  при нормальной эксплуатационной влажности - 0,45, а для  $t < 0^\circ\text{C}$  при влажности близкой к пределу водонасыщения - 0,9.

В диссертации приведено сравнение данных, полученных различными авторами, по предлагаемой формуле и рекомендуемые СНиП П-А. 7-62.

Требуемое термическое сопротивление конструкции наружной стены из панелей при известных материалах можно получить за счет выбора необходимой толщины слоев. В то же время в целях индустриализации, механизации, удешевления и сокращения сроков строительства всегда следует стремиться к уменьшению толщины ограждения. Поэтому одной из важнейших характеристик, определяющих величину термического сопротивления наружного ограждения ( $R_0$ ), является коэффициент теплопроводности материала слоев.

Обычно при расчетных отопительных наружных температурах считается, что 2/3 толщины ( $\delta$ ) ограждения (от наружной поверхности) имеет отрицательную температуру, а при средних температурах наружного воздуха за отопительный период и самого холодного месяца - порядка 1/3  $\delta$ . Учтя это и приняв коэффициент теплопроводности в зависимости от влажности по данным А.У.Франчука, мы подсчитали общие термические сопротивления ( $R_0$ ) конструкций наружных стен из керамзитобетонных и пенобетонных панелей при их различной влаж-

ности. Результаты представлены в виде графиков функций  $R_0 = f(w_0)$ , анализ которой показал, что с возрастанием влагосодержания материала панелей их теплотехнические качества значительно понижаются. Особенно интенсивно это понижение происходит при повышении влажности от 0 до 10% по объему, причем чем ниже температура, тем интенсивнее падение  $R_0$ . Например, общее термическое сопротивление стены из керамзитобетонной панели при  $w_0 = 0\%$  составляет  $1,264 \text{ м}^2 \cdot \text{град/вт}$ , а из пенобетона -  $1,458$ , при увеличении влажности до 10% (при  $t > 0^\circ\text{C}$ )  $R_0$  первого -  $0,960$ , а второго -  $1,018 \text{ м}^2 \cdot \text{град/вт}$ , т.е. меньше на 24 и 30%; при дальнейшем увеличении от 10 до 20%, соответственно,  $R_0$  -  $0,860$  и  $0,825 \text{ м}^2 \cdot \text{град/вт}$ , т.е. меньше, чем при  $w_0 \leq 10\%$ , на 9 и 12,5%. При низких отрицательных температурах эта разница еще больше возрастает.

Несмотря на отрицательную роль влаги, содержащейся в материале наружных ограждений, к сожалению, нормативные документы, такие, как СНиП П-А.7-62, МРТУ-20-9-66, ГОСТ 11024-64 и ряд других, допускают наличие большого количества влаги в конструкциях панелей. Так, например, в соответствии с ГОСТ 11024-64 отпускная влажность керамзитобетонных панелей составляет 12% по весу, в то время как равновесная - всего 5-6%.

Анализируя данные СНиП П-А.7-62, следует отметить, что для большинства конструкций наружных стен из панелей и блоков с легкими искусственными заполнителями допускаются достаточно большие влагосодержания, намного превышающие их максимально-сорбционную влажность.

В Строительных Нормах и Правилах также не учитывается изменение влажностного состояния наружных стеновых конструкций в процессе эксплуатации зданий. Известно, что в первые годы эксплуатации влажность материала наружных стен достаточно высокая (для керамзитобетонных стен она иногда доходит до 23% по массе), а затем из года в год уменьшается; при этом при проектировании ограждений их теплотехнические расчеты ведутся по величине равновесной влажности.

По нашему мнению, при разработке новых строительных норм и правил и других нормативных документов необходимо снизить отпускную влажность большинства крупнопанельных изделий заводского изготовления и пересмотреть величины допустимых влажностей материалов ограждений в процессе их эксплуатации. Нормативы необходимо разработать для всей гаммы номенклатур применяемых стеновых конструкций.

### Глава 3. Влияние воздухопроницаемости наружных стеновых конструкций на их влажностное состояние.

В диссертации приведен расчет гравитационных и ветровых давлений для различных температур внутреннего воздуха помещений и расчетных параметров наружного воздуха. Кроме того, аналитически определено влияние фильтрационного потока на интенсивность удаления влаги из материала и получены дифференциальные уравнения потока испаряющейся влаги, в которых потенциалом переноса является разность парциальных давлений водяных паров.

Произведен анализ существующих методов и установок для экспериментального определения воздухопроницаемости материалов и конструкций, на основании которого выбраны как наиболее отвечающие натурным условиям метод и установка, предложенные на кафедре "Теплогоснабжение и вентиляция" БПИ. На основании использования принципа ее работы, нами разработаны новая установка и методика, дающие более точные результаты измерений по сравнению со всеми существующими. Учтено также влияние разности температур окружающего воздуха и воды в баке и барометрического давления.

Для экспериментальных исследований влияния влагосодержания на воздухопроницаемость были приняты образцы размером 0,25x0,25x0,17 и 0,5x0,5x0,35 м из керамзитобетона объемной массой 660, 700, 800, 890, 960, 1020, 1135, 1210, 1290, 1360, 1420, 1500 кг/м<sup>3</sup>, как одного из наиболее перспективного стенового материала при строительстве крупнопанельных жилых зданий.

При изучении воздухопроницаемости большое внимание уделялось вопросу подлоинного распределения влаги в материале, в зависимости от которого один и тот же образец обладает различной воздухопроницаемостью. Это было подтверждено нашими экспериментами и согласуется с данными, полученными Р.Е.Брилингом. Выдерживание затермизированных образцов при определенном интегральном влагосодержании производилось до момента достижения и поддержания в течение 1-2 суток одинакового показателя всех датчиков влажности, заложенных равномерно по всему объему.

В диссертации воздухопроницаемость оценивалась количеством воздуха  $G$ , проходящего в течение часа через 1 м<sup>2</sup> сечения материала толщиной 1 м при различных перепадах давлений.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в виде графиков  $G=f(\Delta P)$ ,  $G=f(w)$  и  $G=f(T)$  и в таблицах,

Наличие влаги в исследуемых материалах влечет за собой уменьшение размеров пор, а иногда приводит к полному заполнению их водой поэтому количество фильтрующегося воздуха уменьшается, падая до минимума.

Необходимо отметить, что влагосодержание оказывает заметное влияние на воздухопроницаемость, если объемная масса керамзитобетона больше  $800 \text{ кг/м}^3$ . Это объясняется тем, что активное поровое пространство керамзитобетона при таких  $\gamma$  состоит главным образом из макропор радиусом  $30\text{--}50 \text{ мк}$  и более, и даже при максимальном влагосодержании значительная часть объема образцов остается незаполненной жидкостью.

Из анализа результатов эксперимента, выраженных в графических зависимостях между  $G, \Delta P, \gamma, w$ , можно сделать вывод о качественном изменении фильтрации воздуха, начиная с объемной массы материала, равной  $1200 \text{ кг/м}^3$ . Фильтрационные потоки, проходящие через керамзитобетонные образцы с  $\gamma$  более чем  $1200 \text{ кг/м}^3$ , описываются линейными уравнениями вида

$$G = \beta \Delta P, \quad (2)$$

а для менее плотных материалов -

$$G = \alpha \Delta P^2 + \beta \Delta P + c, \quad (3)$$

где  $\alpha, \beta, c$  - коэффициенты, численные значения которых зависят от объемной массы и влагосодержания материалов.

Различный характер прохождения фильтрационного потока через исследуемый материал объясняется особенностями движения воздуха в материалах строительных ограждений, которые, кроме чрезвычайно малых поперечных сечений поровых каналов и исключительно большой роли сил терия, обусловлены еще и крайне малыми скоростями фильтрации.

Используя уравнения (2) и (3) и найдя коэффициент  $\beta$  для различных объемных масс и влагосодержаний методом выбранных точек, получаем расчетные формулы  $G = f(\Delta P, \gamma, w)$  для керамзитобетона с объемной массой  $\gamma = 1200\text{--}1500 \text{ кг/м}^3$

$$G = \Delta P \left[ c_2 \gamma^4 + c_3 \gamma^3 + c_4 \gamma^2 + c_5 \gamma + c_6 - w^2 (a_2 \gamma^2 + a_3 \gamma + a_4) - w (\beta_2 \gamma^2 + \beta_3 \gamma + \beta_4) \right] \dots \quad (4)$$

$$G = 850 - 1210 \text{ кг/м}^3$$

$$G = \Delta P^2 \left[ a_4 \gamma^2 + b_7 \gamma + c_7 - w(a_1 \gamma^2 + b_4 \gamma + c_4) \right] + \\ + \Delta P \left[ a_5 \gamma^3 + a_6 \gamma^2 + b_8 \gamma + c_8 - w(a_2 \gamma^2 + b_5 \gamma + c_5) \right] + \\ + a_7 \gamma^3 + a_8 \gamma^2 + b_9 \gamma + c_9 - w(a_3 \gamma^3 + b_6 \gamma + c_6) \dots \quad (5)$$

В диссертации произведено вычисление коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $d$ .

Решения численных примеров показывают, что величины, полученные по выражениям (4) и (5), отличаются от опытных соответственно на I, II и 4,05%, что вполне допустимо. Но расчет по формулам (4) и (5) громоздок и требует тщательности вычислений, так как для получения достаточно точных результатов коэффициенты необходимо брать с 4-5 десятичными знаками. В противном случае происходит потеря значащих цифр, что ведет к увеличению ошибки. Для облегчения расчетов по формулам (4) и (5) построены две номограммы из выравненных точек, приведенные на рис. I и 2.

Как пользоваться номограммами, показано на следующих примерах.

1. Необходимо определить количество воздуха, проходящего через I м<sup>2</sup> керамзитобетонного материала толщиной слоя I м при  $w = 7\%$ ,  $\gamma = 1280 \text{ кг/м}^3$  и  $\Delta P = 49,0 \text{ н/м}^2$ .

**Решение.** На бинарном поле (рис. I) находим точку пересечения линий  $w = 7\%$  и  $\gamma = 1280 \text{ кг/м}^3$  - точка А. Из нее проводим горизонталь до пересечения со шкалой II - точка В. Затем полученную точку соединяем с точкой С, где  $\Delta P = 49,0 \text{ н/м}^2$ . Искомое количество фильтрующегося воздуха  $G$  находим в точке пересечения линии ВС и шкалы I - точка D. Оно равно  $0,95 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ .

2. Требуется найти количество воздуха, проходящего через керамзитобетон толщиной слоя I м при  $w = 17\%$ ,  $\gamma = 990 \text{ кг/м}^3$  и  $\Delta P = 49 \text{ н/м}^2$ .

**Решение.** На бинарном поле между шкалами II и III находим точку А, соответствующую  $\gamma = 990 \text{ кг/м}^3$ ,  $w = 16\%$  (рис. 2). Из точки А проводим горизонталь до пересечения со шкалой II и получаем точку В. Через точку С, соответствующую  $\Delta P = 49 \text{ н/м}^2$ , и точку В проводим линию до пересечения со шкалой III - точка D. На бинарном поле, расположенном между шкалами III и IV, находим точку Е, где  $\gamma = 990 \text{ кг/м}^3$ ,  $w = 16\%$ . Из точки Е проводим горизонталь до пересечения со шкалой IV - точка F.

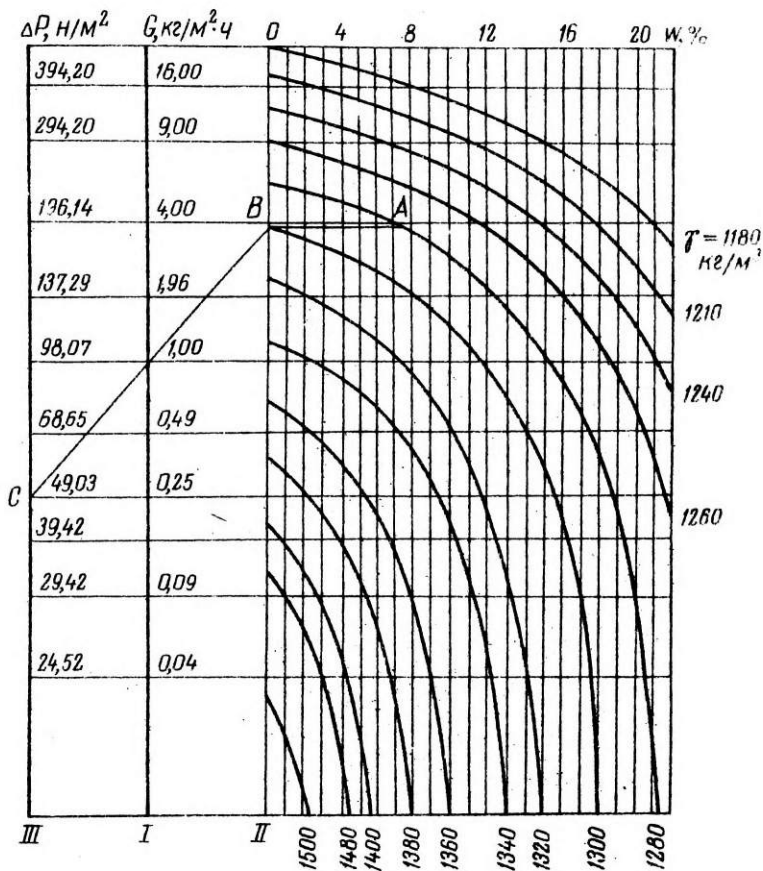


Рис. I. Номограмма  $G = f(w, T, \Delta P)$  при  $T = 1150 - 1500 \text{ KZ/M}^2$

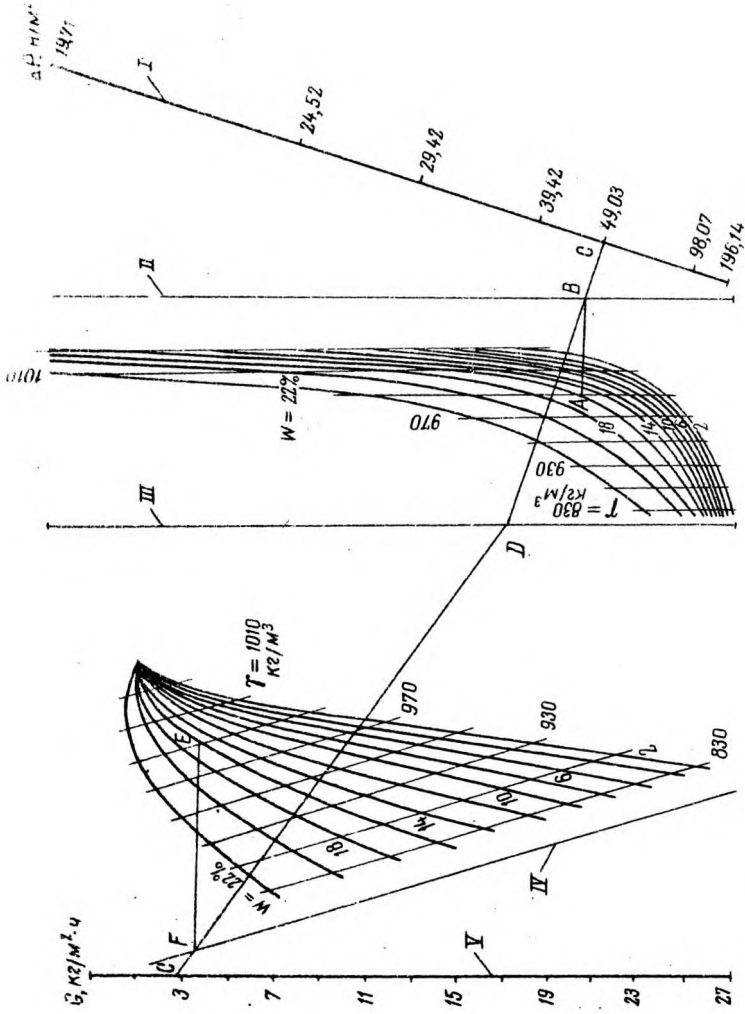


Рис. 2.

Проводя через точки  $F$  и  $D$  прямую до пересечения со шкалой  $U$ , находим искомый фильтрационный поток, равный  $3,02 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ .

Принятыми методами вывода расчетных формул и построения номограмм можно пользоваться при исследовании воздухопроницаемости любых легких бетонов и других строительных материалов, имеющих указанные пределы объемных масс.

Начи определена ошибка эксперимента, средняя величина которой составляет  $7,5\%$ , что вполне допустимо.

В конце главы приведены выводы.

По разделу I в работе даются выводы, краткое содержание которых сводится к следующему:

1. Наибольшее распространение получают однослойные стеновые панели из легких бетонов на пористых заполнителях, особенно из керамзитобетона с объемной массой  $\gamma = 900-1200 \text{ кг/м}^3$ , свойства которого позволяют изготавливать стеновые панели с широким диапазоном прочностных, теплозащитных и звукоизоляционных качеств и с достаточно эффективным их сочетанием.

2. Наиболее ощутимо влияние влагосодержания на воздухопроницаемость керамзитобетона с  $\gamma \geq 900 \text{ кг/м}^3$ . Поэтому в первые годы эксплуатации жилых зданий фильтрационный поток не окажет заметного действия на динамику влажности материала наружных стен.

3. Общее послепостроечное влагосодержание материала наружных стен жилых зданий из панелей и крупных блоков стало не меньше, чем стен из кирпича, а в некоторых случаях даже больше. При этом наибольшее количество влаги вносится в панели и блоки в процессе заводского изготовления, которая составляет  $55-75\%$  общего послепостроечного влагосодержания материала стен.

4. Отечественная и зарубежная практика эксплуатации жилых зданий из крупных блоков и панелей показывает, что наружные стены высыхают до равновесной влажности через  $3-7$  лет после окончания строительства, а неблагоприятных климатических и эксплуатационных условиях даже могут дополнительно увлажниться.

5. Термическое сопротивление конструкции наружной стены из легких бетонов в большой мере зависит от влагосодержания материала. Поэтому при выборе расчетной величины коэффициента теплопроводности следует учитывать эксплуатационное влагосодержание и температуру материала стен.

6. Строительными Нормами и Правилами (СНИП П-А.7-62) нормируется влажность материала конструкций из легких бетонов, влажность превышающая нормальную эксплуатационно-равновесную, что при современном уровне развития строительной науки и техники недопустимо. Поэтому при разработке новых строительных норм и правил и других нормативных документов необходимо снизить отпускную влажность большинства крупнопанельных изделий заводского изготовления и пересмотреть в сторону уменьшения величины допустимых влажностей материалов ограждений в процессе их эксплуатации.

#### Глава 4. Методы измерений влагосодержания исследуемого материала.

С учетом недостатков методов: емкостного, кондуктометрического, гальванического, диэлектрических потерь и излучений радиоизотопов, - в работе нами использованы весовой, СВЧ (сверхвысоких частот) и поляризационный методы измерения, теоретически и экспериментально обосновано их применение для исследования динамики влагосодержания исходных материалов и бетона панелей в процессе лабораторных и полупромышленных экспериментов.

I. Метод СВЧ. Если структуру влажного строительного материала с некоторым допущением считать изотропной со сферическими включениями капелек воды радиусом  $r$ , то эффективная площадь рассеяния включений будет определяться по выражению

$$\sigma = \frac{4\pi^2}{3\lambda} \cdot 3C_1 r^3 \approx \frac{3\pi W}{\lambda N} C_1, \quad (6)$$

где  $\lambda$  - длина электромагнитной волны СВЧ;

$N$  - количество частиц воды в единице объема;

$C_1$  - функция диэлектрической проницаемости воды ( $\epsilon_1$ ),

$$C_1 = \frac{6\epsilon_1''}{(\epsilon_1' + 2)^2 + (\epsilon_1'')^2}, \quad (7)$$

здесь  $\epsilon_1', \epsilon_1''$  - первая и вторая производные диэлектрической проницаемости воды;

$W$  - количество воды, содержащейся в единице объема влажного материала,

$$W = \frac{4}{3} \pi r^3 N. \quad (8)$$

Пользуясь этими выражениями, можно рассчитать поглощение, рассеяние, а следовательно, и ослабление электромагнитной энергии СВЧ влажным материалом.

Произведя ряд преобразований, получаем выражение полного ослабления электромагнитной энергии СВЧ во влажном материале

$$N_{дБ} = \left( \frac{470 c_1 \ell}{\lambda} + \frac{940 \tau^3 \ell}{4\lambda} \right) W, \quad (9)$$

откуда находим объемное влагосодержание

$$W = \frac{N_{дБ}}{\frac{470 c_1 \ell}{\lambda} + \frac{940 \tau^3 \ell}{4\lambda}}. \quad (10)$$

При  $\tau \ll \lambda$  вторым членом знаменателя выражения (10) можно пренебречь, так как  $\frac{940 \tau^3 \ell}{4\lambda} \ll 1$ , а следовательно, - затуханием электромагнитной энергии СВЧ в результате ее рассеяния частицами воды и сухого материала.

Тогда (10) примет вид:

$$W = \frac{N_{дБ} \lambda}{470 c_1 \ell}. \quad (11)$$

При постоянных величинах длины волн  $\lambda$ , образцов и коэффициента  $c_1$  влагосодержание материала будет прямо пропорционально величине ослабления в нем потока электромагнитной энергии СВЧ.

В формуле (11) не учтена величина ослабления электромагнитной энергии СВЧ частицами сухого материала, так как она постоянна для данного материала.

В работе приведены графики зависимости ослабления электромагнитной энергии СВЧ от влагосодержания при различных длинах волн, из которых видно, что поглощение резко повышается с возрастанием частоты. Кроме того произведен анализ изменения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  и вычислены значения  $c_1$  в зависимости от длины волны и температуры.

Значения  $c_1$  с ростом температуры экспоненциально убывает при различных значениях длины волны, отличаясь только абсолютным значением. Наиболее резкое изменение наблюдается в интервале температур от 0 до +30<sup>0</sup>С. Результаты анализа и вычислений представлены в виде таблиц и графиков.

Применительно к заводским условиям изготовления стеновых панелей при измерении влажности исходных материалов по поглощению энергии СВЧ представляет интерес интервал температур от  $-10$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ , где коэффициент  $\epsilon$ , изменяется независимо от длины волны приблизительно в 1,7 раза.

Таким образом, анализ зависимости коэффициента  $\epsilon$ , от температуры показывает, что с целью уменьшения общей погрешности измерения влажности по поглощению электромагнитной энергии СВЧ необходимо вводить температурную поправку, величина которой должна быть найдена экспериментальным путем.

Результаты исследований многих авторов, в том числе и наши показали, что в диапазоне СВЧ влиянием химического состава воды на ее диэлектрические свойства, а следовательно, и на точность определения влажности строительных материалов, по поглощению электромагнитной энергии СВЧ, можно пренебречь.

2. Метод поляризации электродов. В нашем случае влажность измерялась при наличии контактного влагообмена между исследуемым материалом и заформованными образцами, т.е. методом гидротермического равновесия.

Если материал оттарированного образца отличается от исследуемого, то тогда условием гидротермического равновесия между ними является равенство потенциалов переноса влаги датчика  $\theta_1$  и исследуемого материала  $\theta_2$ . В этом случае при достижении равновесия на границе соприкосновения потенциалы равны, а влагосодержания могут быть не одинаковыми. Зависимость между влагосодержанием и потенциалом переноса влаги выражается уравнением:

$$w = \int_0^{\theta} c d\theta = c_m \theta, \quad (12)$$

где  $c$  - удельная изотермическая массоемкость (влагоемкость тела), кг/кг  $^{\circ}\text{M}$ ;

$c_m$  - средняя удельная изотермическая массоемкость тела в интервале потенциалов переноса влаги от  $\theta_1$  до  $\theta_2$ , кг/кг  $^{\circ}\text{M}$ .

Для одних и тех же материалов при равномерном распределении  $w_1 = w_2$ ,  $\theta_1 = \theta_2$  и  $c_{1m} = c_{2m}$ , т.е. геометрические размеры капилляров и их соотношения первого и второго тела одинаковы, что можно достигнуть при закладке образцов в исследуемый материал той же объемной массы. Но так как полученная объемная масса изде-

лий и образцов не всегда совпадает с проектируемой, в процессе тарировки необходимо определять потенциалы массопереноса материала.

Потенциал массопереноса  $\theta$  находится из выражения

$$\theta = \left( \frac{W_3}{W_{cm}} \right) \cdot 100, \quad (13)$$

где  $W_3$  — влагосодержание эталонного тела;

$W_{cm}$  — максимальное сорбционное влагосодержание эталонного тела при температуре 25°C.

Определив потенциалы переноса влаги для различных значений влагосодержания материала, можно найти зависимости  $W = f(\theta)$  для различных объемных масс. Следовательно, даже при  $\gamma$  материала, отличающемся от  $\gamma$  оттарированного образца, можно избежать погрешности в определении  $W$ .

Для экспериментальной проверки методов СВЧ и поляризации электродов в соответствии с ГОСТ 8735-58 были взяты пробы кварцевого песка фракции 0,15; 0,3; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0 и 5,0 мм, толщиной слоя 250 и 148 мм, а также красный кирпич, ель, дуб, береза и керамзитобетон с объемной массой 810, 915, 970, 995, 1110, 1160, 1200, 1250, 1290 и 1310 кг/м<sup>3</sup>. Максимальное влагонасыщение образцов производилось в соответствии с ГОСТ 7025-54. Влагосодержание от максимального значения до заданного изменялось сушкой образцов инфракрасными лампами и продувкой воздуха через них. Степень равномерности распределения влаги определялась экспериментально по показаниям датчиков влажности. Выдерживание загерметизированных образцов при данном интегральном влагосодержании производилось до момента достижения единого показания всех датчиков влажности, заложенных по всему объему образцов, и еще дополнительно 1-2 суток.

В процессе экспериментальных исследований зависимости ослабления энергии СВЧ от степени уплотнения, размеров частиц, температуры и влажности материалов и химического состава влаги определялись вес, средний диаметр частиц, температура, влагосодержание и толщина материала образца, время его уплотнения, концентрация раствора NaCl в воде, показания уровня выхода электромагнитной энергии СВЧ и прибора на выходе узкополосного усилителя, а также частота, длина волны и величина ослабления электромагнитной энергии СВЧ.

Все исследования производились при толщине материала 148 и 250 мм и частотах 7,7 и 10 гц.

Образцы с песком исследовались при трех различных видах уплотнения: вручную и на лабораторном вибростоле в течение 3,5 и 10 сек при температуре, равной 20°C.

Зависимости величины ослабления электромагнитной энергии СВЧ от температуры материала, а также от его влагосодержания при увлажнении водопроводной и дистиллированной водой и 2%-ным раствором  $NaCl$  исследовались на песке фракции 0,5-0,6 мм.

Данные измерений сведены в таблицы и приведены в Приложениях к диссертации. В процессе экспериментирования была выявлена зависимость разности потенциалов ( $U_1 - U_2$ ) электродов от температуры, расстояния между электродами и влагосодержания.

Для получения правильных значений  $U_1 - U_2$  при длительных замерах каждый раз восстанавливалась "симметрия электродов", т.е. разряжался поляризационный элемент. В противном случае, вследствие протекающих химических реакций на электродах, уменьшалась их поляризационная э.д.с. Время прохождения тока и напряжение нагрузки поляриности равно времени прохождения тока и напряжению при снятии отсчета (соответственно 10 мин и 10 в).

Зависимость времени восстановления симметрии электродов исследовалась на образцах из керамзитобетона и цементно-песчаных растворов. Электроды имели цилиндрическую форму. Напряжение внешней нагрузки 10 в, время зарядки - 10 мин.

Результаты исследований приведены в виде графиков. Они показали, что продолжительность восстановления симметрии электродов для одного и того же образца при всех равных условиях неодинакова. Максимальное значение  $U_1 - U_2$  для одной и той же влажности при неизменных других параметрах остается постоянным. Поэтому нами измерялось не время восстановления равновесия электродов, а максимальное значение разности потенциалов поляризованных электродов.

Влияние температуры на разность потенциалов  $U_1 - U_2$  поляризованных электродов исследовалось на образцах из цементно-песчаного раствора, в которые заделаны два посеребренных электрода размером 10x10 мм на расстоянии 10 мм один от другого.

Зависимость разности потенциалов  $U_1 - U_2$  поляризованных электродов от расстояния между ними ( $\delta$ ), изучалась на песке объемной массой 1610 кг/м<sup>3</sup> и стальных электродах размером 40x45 мм. Время поляризации 5 мин, а напряжение внешней нагрузки - 10 в.

Зависимость разности потенциалов  $U_1 - U_2$  поляризованных электродов от величины напряжения зарядного тока и времени его прохождения исследовалась на гипсовых, цементных, керамзитобетонных и других образцах, размеры которых не превышали 10x10x10 см. Исследовались различные электроды при различных расстояниях между ними.

С учетом того обстоятельства, что разность потенциалов поляризованных электродов зависит не только от влажности, но и от свойств материалов, для каждого образца находилась индивидуальная зависимость  $U_1 - U_2 = f(w)$ .

Чтобы исключить погрешности из-за неодинаковых объемных масс датчиков влажности и исследуемых образцов, определялась зависимость между потенциалами переноса влаги и влагосодержанием керамзитобетона при различных его объемных массах.

Для получения наиболее вероятного значения измеряемой величины влагосодержания материалов результаты экспериментальных исследований обработаны нами как по методу наименьших квадратов, так и графически в обычных прямоугольных координатах.

Результаты обработки экспериментальных данных по выявлению зависимости разности потенциалов  $U_1 - U_2$  поляризованных электродов от температуры, расстояния между электродами, напряжения внешней нагрузки, времени прохождения зарядного тока и влагосодержания материала, а также зависимости потенциала переноса влаги от влагосодержания керамзитобетона приведены в диссертации в виде графиков.

Из анализа кривых следует:

1. Разность потенциалов  $U_1 - U_2$  поляризованных электродов, помещенных в строительные материалы, увеличивается с повышением температуры по линейному закону.

2. Зависимость разности потенциалов  $U_1 - U_2$  от расстояния между поляризованными электродами описывается кривыми параболического вида. Характер кривых с изменением влагосодержания не меняется и описывается полученной нами эмпирической формулой вида

$$U_1 - U_2 = \delta(0,04w + 0,05) + \delta(0,87w + 1,49) + 6,8w, \quad (14)$$

где  $\delta$  - расстояние между электродами.

3. Разность потенциалов  $U_1 - U_2$  поляризованных электродов увеличивается с увеличением времени прохождения зарядного тока.

4. Для возможности измерения влажности исследуемой системы необходимо заделать в нее образцы с электродами, что удобнее и правильнее производить в заводских условиях при формовании изделий.

Результаты определения погрешностей измерений влагосодержания материалов дали следующие средние величины дисперсии: по СВЧ  $\sigma_{10} = 1,4\%$  и  $\sigma_{37} = 1,8$ , а поляризации электродов -  $\sigma = 1,33\%$ . В конце главы даны краткие выводы.

#### Глава 5. Влияние технологических факторов на величину остаточного влагосодержания материала панелей.

Для большинства исходных материалов характерно быстрое водопоглощение; при этом за 1 час насыщение водой будет почти таким же, как за 48 часов, а, например, перлитовый песок основную массу воды поглощает за первые 15 минут. Это подтверждено и данными многих других исследователей.

В то же время как мелкие, так и крупные, в их числе и пористые, заполнители зачастую хранятся на открытом воздухе. Особенно нежелательны открытое хранение и перевозка пористых заполнителей в осенне-зимний период, когда условия увлажнения не отвечают условиям естественной сушки материалов. Так, например, результаты наших исследований показали, что для климатических условий Белоруссии в зимнее время присущи дожди с неоднократным переходом суточной температуры наружного воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$ . По данным многих исследователей, при транспортировке и формировании изделий происходят испарение и утечка воды затворения через неплотности транспортных устройств и форм. Особенно сильное испарение наблюдается летом. Это выявлено и нашими исследованиями, проведенными на заводах железобетонных изделий ДСК-1 гор. Минска и ЖБИ № II МПС БССР. Потеря воды затворения при этих операциях составляет в керамзитобетоне от 24,3 до 67,8, а в тяжелом - 60-65,5 л/м<sup>3</sup> бетона.

Несмотря на такую большую потерю, оставшейся влаги в бетоне, вполне достаточно для полной гидратации цемента. Например, на кубометр керамзитобетона остается 114-167 л воды, а для полной гидратации еще не прогидратировавшегося цемента достаточно 54,0 л. Таким образом, имеется 60-113 л свободной воды. Если принять среднее количество оставшейся воды равным 80 л и учесть равновесное влагосодержание керамзитобетонных панелей наружных стен, которое в нормальных условиях эксплуатации составляет 5-6% по массе или 50-60 л, то от окончания формирования панелей до сдачи здания в эксплуатацию из 1 м<sup>3</sup> панелей необходимо удалить до 20-30 л влаги.

В диссертации приведена классификация методов тепловой обработки по их влиянию на влажностное состояние обрабатываемых изделий, которые разделены на шесть групп.

1. Тепловая обработка с применением в качестве теплоносителя насыщенного пара, влажных газов, влажного воздуха, парогазовой смеси и различных жидкостей, соприкасающихся с открытыми поверхностями обрабатываемых изделий.

2. Тепловая обработка с применением в качестве теплоносителя насыщенного пара, влажных газов, влажного воздуха, парогазовой смеси и различных жидкостей, передающих тепло обрабатываемому изделию через разделительную стенку.

3. Тепловая обработка с применением в качестве источника тепловой энергии электрического тока, пропускаемого непосредственно через неизолированное от окружающей среды обрабатываемое изделие.

4. Тепловая обработка с применением в качестве источника тепловой энергии электрического тока, пропускаемого непосредственно через изолированное от окружающей среды обрабатываемое изделие.

5. Обогрев в электромагнитном поле при соприкосновении среды камеры с поверхностями обрабатываемого изделия.

6. Обогрев инфракрасными излучателями открытых поверхностей. Особенностью методов первой группы является конденсация водяных паров на открытых поверхностях, что способствует дополнительному увлажнению материала. Кроме того, эти методы продолжительны, теплоемки и дают большие перепады температур. При нормальной скорости разогрева ( $10-15^{\circ}\text{C}$  в час) перепад температур между средой и бетоном достигает  $35-40^{\circ}\text{C}$ , а при скорости  $30-40^{\circ}\text{C}$  в час -  $60^{\circ}\text{C}$  в течение 2 часов. Если среда в камере предварительно будет разогрета до  $100^{\circ}\text{C}$ , то  $\Delta t$  в теле панели будут достигать  $65-70^{\circ}\text{C}$ .

При тепловой обработке по второй группе изделие будет соприкасаться с окружающим воздухом или герметически закрыто. В первом случае наблюдается уменьшение влагосодержания материала изделий, особенно в ямных камерах, а во втором оно не меняется. Поэтому в первом случае в целях получения изделий без деструктивных явлений требуется дополнительное увлажнение среды камер, что приводит к перерасходу тепла. Во втором случае при тепловой обработке легких бетонов на пористых заполнителях остается много излишней влаги.

При применении третьей группы методов тепло выделяется в самом обрабатываемом изделии и температурный градиент направлен во внутрен-

ние слои. Изделие соприкасается с окружающей средой, имеющей низкие параметры ( $t, \varphi$ ). Поэтому условия тепло- и массообмена изделия с окружающей средой способствуют сильному обезвоживанию обрабатываемого материала, что приводит к деструктивным явлениям. Лучшие условия для получения заданного влагосодержания материала обрабатываемых изделий получаются при применении методов четвертой группы, а процесс тепловой обработки позволяет автоматизировать удаление влаги из изделий.

Тепловая обработка по методам пятой группы происходит при соприкосновении изделия со средой негерметичной камеры, и для избежания деструктивных явлений в этом случае иногда приходится увлажнять среду камеры путем испарения определенного количества воды, что требует дополнительного расхода тепла.

К шестой группе следует отнести тепловую обработку в щелевых и ямных камерах с обогревом изделий при помощи: 1) электротенов; 2) ламп инфракрасного излучения; 3) газовых инфракрасных излучателей и 4) в камерах с теплоизлучающими поверхностями.

Тепловая обработка по первым трем способам также требует увлажнения среды камеры.

Самые благоприятные условия для получения заданного влагосодержания материала изделия создаются при тепловой обработке в камерах с теплоизлучающими поверхностями.

Изменение влагосодержания керамзитобетонных панелей и трехслойных при тепловой обработке в ямных камерах (завод № II) и под колпаками стендовых форм (завод ДСК-1 гор. Минска) исследовалось нами в производственных условиях. Из анализа результатов экспериментальных данных следует:

1) в процессе тепловой обработки панелей в ямных камерах и под колпаками стендовых форм их влагосодержание увеличивается; при этом у керамзитобетона на I, 8-13, а у тяжелого - 0,3-3% по массе;

2) водопоглощение бетона панелей в процессе тепловой обработки зависит от его первоначального влагосодержания и продолжительности цикла обработки;

3) для уменьшения водопоглощения материала предпочтительнее тепловую обработку панелей производить под колпаками стендовых форм;

4) применение методов второй группы позволит избежать приращенения влагосодержания материала панелей при их тепловой обработке,

а при применении третьей - шестой групп - даже уменьшить.

В получении заданного влагосодержания материала керамзитобетонных панелей наружных стен, как и панелей другой конструкции, большую роль играет процесс охлаждения после их тепловой обработки в установках с непосредственным контактом пара с открытой поверхностью изделий. Существенное влияние на скорость охлаждения панели оказывает испарение влаги с поверхности изделий, особенно непосредственно после окончания тепловой обработки.

Многолетний опыт производства керамзитобетонных панелей наружных стен жилых зданий показывает, что процесс охлаждения и сушки доходит иногда до 20-30 часов. На качество изделий и продолжительность охлаждения и сушки в основном можно влиять путем изменения внешних условий тепло- и массообмена изделия с окружающей средой. Этот процесс зависит от температуры влагосодержания материала, качества и метода отделки поверхностей панели, а также от параметров и скорости движения окружающего воздуха, которые можно изменять в процессе охлаждения.

По условиям воздействия окружающей среды на тепловлажностное состояние материала панелей в сложившихся технологических условиях процесс охлаждения разделен нами на три этапа.

На первом этапе производится искусственное обдувание холодным воздухом ( $t_g \approx 25^{\circ}\text{C}$ ) закрытой камеры с панелями, в результате чего возникают значительные перепады температур между поверхностью изделия и окружающей средой.

На втором - панель в опалубке лежит в цехе и ее охлаждение протекает в условиях свободной конвекции воздуха с постоянной скоростью испарения и сжигания температуры материала панели.

На третьем - панель после распалубки ставится вертикально для окончательной отделки. Ее охлаждение характеризуется уменьшением скорости испарения влаги и снижением температуры окружающей среды.

В диссертации произведены расчеты процесса охлаждения и сушки панелей по балансу тепла и по условиям воздействия внешней среды.

Результаты исследований показывают, что, применяя искусственный обдув воздухом ( $t = 25-30^{\circ}\text{C}$  и  $\varphi = 60-75\%$ ) панелей после извлечения из камеры и распалубки, можно создать такие тепловлажностные условия, в период их охлаждения и окончательной отделки, которые позволяют снизить остаточное влагосодержание материала до 8,8%, что ниже допустимого по нормам.

В диссертации приведены результаты исследований влагоотдачи материалом керамзитобетонных панелей в процессе охлаждения и доводочной отделки на образцах размером  $0,35 \times 0,35 \times 0,35$  м, результаты которых показали, что за 22-часовой период охлаждения при естественной конвекции окружающего воздуха можно получить остаточное влагосодержание порядка 14-15%, т.е. на 2-3% выше нормативного (12%).

Экспериментальные исследования динамики удаления влаги из камеры в процессе ее продувки проведены в натуральных условиях на заводе железобетонных изделий № 11 МПС БССР. Всего проведено четыре опыта при различных режимах тепловой обработки. По полученным данным построен рис.3.

В работе предложена функциональная схема автоматизации дозировки воды при приготовлении смеси бетона с учетом влагосодержания применяемых заполнителей.

На основе анализа результатов исследований в конце главы даются выводы, краткое содержание которых сводится к следующему:

1. Величина остаточного влагосодержания материала панелей наружных стен, применяемых в настоящее время в массовом жилищном строительстве, находится в прямой зависимости от технологических факторов: хранения, транспортировки, дозировки исходных материалов и метода тепловой обработки. Особенно сильное влияние на получение заданного влажностного состояния материала панелей оказывает дозировка компонентов смеси бетона и способ тепловой обработки.

2. Процесс дозировки компонентов смеси бетона требует автоматизации с учетом действительного влагосодержания исходных материалов.

3. При тепловой обработке панелей наружных стен жилых зданий, особенно из легких бетонов на пористых заполнителях, в установках с непосредственным соприкосновением насыщенного влажного пара или любого другого влажного теплоносителя с открытыми поверхностями изделий без удлинения сроков изготовления, т.е. без снижения производительности завода или цеха и удорожания заводской себестоимости, допустимое отпускное влагосодержание достичь невозможно.

4. Для ускорения темпов и снижения стоимости строительства и эксплуатационных качеств жилых зданий необходимы новые методы тепловой обработки панелей из легких бетонов на пористых заполнителях, обеспечивающие сокращение их сроков изготовления, снижение себе-

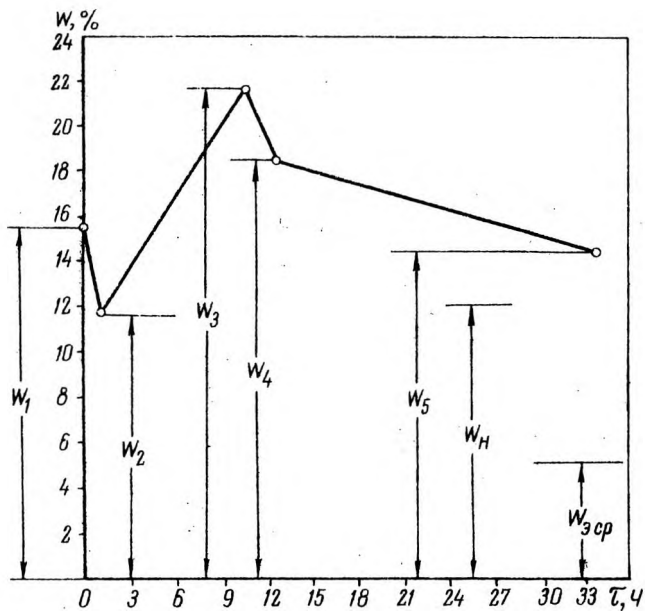


Рис. 3. Динамика влагосодержания керамзитобетона панелей наружных стен в процессе заводского их изготовления:

- $W_1$  - влагосодержание после приготовления смеси;
- $W_2, W_3$  - влагосодержание перед и после тепловой обработки;
- $W_4$  - влагосодержание после окончания продувки камеры;
- $W_5$  - влагосодержание перед отправкой на склад готовых изделий или отпускное;
- $W_H$  - нормативное отпускное влагосодержание /ГОСТ 11024-64/;
- $W_{зср}$  - среднее эксплуатационное влагосодержание при нормальных условиях эксплуатации в районах Прибалтики и Белоруссии.

стоимости и улучшение тепловлажностного состояния и физико-механических качеств.

Глава 6. Получение заданного влажностного состояния панелей путем тепловой обработки в установках с теплоизлучающими поверхностями.

Анализ существующих методов тепловой обработки стеновых панелей, в том числе и с применением электрической энергии, показал сложность получения изделий с заданным влажностным состоянием: при одних способах изделия переувлажняются, а при других - пересушиваются. Известно, что и переувлажнение, и пересушивание отрицательно влияют на физико-механические качества изделий.

Стремясь хотя бы частично устранить перечисленные выше недостатки, автор и группа инженеров завода железобетонных изделий ДСК-1 г. Минска и лаборатории строительной теплофизики БПИ разработали технологию тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий в электроиндукционной установке с теплоизлучающими поверхностями.

В ноябре 1964 г. была построена лабораторная, а в январе 1966 г. - полупромышленная установки. Обмотка электроиндукционной установки подключается в трехфазную электрическую сеть напряжением 220/380 в промышленной частоте.

Установку можно рассматривать как трансформатор с соленоидом прямоугольного сечения в качестве первичной обмотки и с нагревательными стальными стенками рабочей камеры, помещенной внутри соленоида, - в качестве вторичной обмотки. При прохождении переменного тока по виткам обмотки вокруг нее образуется переменное магнитное поле, создающее наибольшую плотность внутри соленоида. Этот магнитный поток, пронизывая стенки камеры, индуцирует в них э.д.с., вызывающую вихревые токи в плоскостях, перпендикулярных к оси соленоида. В результате явления гистерезиса и возникновения индукционных токов в стенках камеры генерируется тепло, за счет чего они нагреваются до 190-220<sup>0</sup>С, а воздушная среда в камере - до 120-145<sup>0</sup>С.

Бетонные и железобетонные изделия, помещенные в рабочее пространство камеры, нагреваются за счет лучистого и, частично, конвективного теплообмена. В зависимости от массивности изделия продолжительность их прогрева до 70-80<sup>0</sup>С при включенной обмотке составляет 2,5-3 часа. Дальнейший прогрев бетона до 85-90<sup>0</sup>С, а керамзитобетона до 95<sup>0</sup>С и выше происходит за счет аккумуляции тепла корпусом установки

и экзотермии цемента. Общая продолжительность цикла тепловой обработки с достижением распалубочной прочности  $R_p = (0,6+0,7) R_M$  составляет: стеновых панелей из легких бетонов на пористых заполнителях 5 часов, трехслойных стеновых панелей из тяжелого бетона 6 и многопустотных плит перекрытий 3,5-4.

Исследования напряженности магнитного поля как вокруг, так и внутри рабочего пространства камеры показали отсутствие магнитного поля внутри установки и наличие потерь энергии снаружи, для ликвидации которых был применен металлический экран по внешней поверхности обмотки.

Опыты проведены на панелях НС-3 трехслойной конструкции из тяжелого бетона М-200 (Ц-335, Г-1250, П-700, В-140) и теплоизоляционного слоя из минераловатных плит и однослойной - из керамзитобетона М-100 (Ц-320, К-550, П-350, В-180). В камеру одновременно загружались четыре панели: две по длине камеры и в два яруса по высоте. Для контроля нарастания прочности бетона одновременно с панелями в нижнюю и верхнюю зоны камеры загружались по 6 контрольных кубиков размером 150x150x150 мм, изготовленных из той же смеси бетона.

Изучение температурных полей воздушной среды и внутренних поверхностей стенок производилось при незагруженной и загруженной изделиями камере. В первом случае наблюдения за температурой велись по 24 точкам, а во втором - по 22.

Режим тепловой обработки: для трехслойных стеновых панелей 3+3=6 часов и керамзитобетонных - 3,5+2,5 = 6 часов.

Влагосодержание воздушной среды камеры определялось конденсационным методом, т.е. измерением температуры, при которой начинается процесс конденсации водяных паров.

Динамика влагосодержания материала панелей исследовалась на образцах размерами 200x200x250 мм, которые имели те же слои и толщину, что и панели. Образцы вместе с панелями загружались в камеру для тепловой обработки.

Для выявления динамики влагосодержания материала панелей на различных уровнях камеры образцы размещались по высоте в трех зонах: в верхней, средней и нижней.

Основываясь на особенностях физико-химических процессов твердения и изменчивости физических свойств цементного камня, кинетику процесса структурообразования можно разбить на три периода.

Первый - до момента начала схватывания. Цементное тесто представляет собой структуру флоккул и мицелл, пространство между которыми заполнено водой, т.е. чисто коллоидную или предкапиллярно-пористую. Этому периоду соответствуют резкое повышение пластической прочности и незначительное изменение потенциала массопереноса, увеличивающегося к его концу.

Второй - переход рыхлой коллоидной структуры цементного теста в структуру твердого тела. Цементное тесто претерпевает значительные качественные изменения, вызванные появлением кристаллического каркаса. Возникающая структура является уже структурой коллоидного капиллярно-пористого тела. Данный период характеризуется интенсивным увеличением прочности и интенсивным уменьшением потенциала массопереноса.

Третий - кристаллическое упрочнение капиллярно-пористой структуры - характеризуется преобладанием кристаллических новообразований, волнообразным изменением прочности и соответствующим волнообразным изменением потенциала массопереноса.

Представленная гипотеза - схема изменения структуры цементного камня и наличие заполнителя, особенно легкого пористого, позволяют считать твердеющий бетон коллоидным капиллярно-пористым телом со второго периода структурообразования цементного камня, т.е. к моменту начала тепловой обработки. Масса отформованной панели к этому времени приобретает структурную определенность и к ней применимо понятие капиллярно-пористого тела.

Для получения прочного бетона без деструктивных явлений необходимо обеспечить равенство скоростей удаления влаги через поверхности изделия и скорости миграции влаги к ним из глубинных слоев, которые всецело зависят от тепло-и влагообменных процессов, возникающих при тепловой обработке бетонов.

При тепловой обработке в предлагаемых камерах теплообмен между нагретыми ее поверхностями и обрабатываемыми изделиями происходит за счет лучеиспускания и частично конвекции. Это позволяет получать незначительные градиенты температур по высоте камеры и равномерный тепловой поток по всей открытой поверхности изделий, а некоторая герметизация камеры помогает регулировать процессы испарения, т.е. не нарушать равенства скоростей удаления влаги и ее миграции из внутренних слоев к поверхностным.

Анализ экспериментальных данных позволил выявить следующую картину.

Перепады между температурой среды камеры и температурой среднего слоя материала трехслойных панелей к моменту выключения установки составляют 70, а керамзитобетонных - 44-48°C. К концу процесса тепловой обработки соответственно - 31-34 и 12-22°C.

Перепады температур между слоями трехслойных панелей к моменту выключения установки доходят до 21°C, керамзитобетонных - до 6. В последних самые большие перепады 7-9°C наблюдаются через один час после начала тепловой обработки. К концу тепловой обработки перепады температур значительно уменьшаются и составляют: в трехслойных - 3-5, а в керамзитобетонных - 4-5°C.

При двухъярусном расположении панелей температура нижней поверхности нижней панели выше, чем температура ее верхней поверхности, но ниже температуры верхней поверхности верхней панели. Эти перепады незначительны. Поэтому можно производить загрузку камеры в два яруса, но лучше в один, так как в последнем случае происходит более равномерное распределение температур по толще изделий.

В первый период тепловой обработки (при загрузке изделия в камеру с температурой воздушной среды 40-60°C) наблюдается незначительное падение влагосодержания и относительной влажности воздушной среды камеры, что свидетельствует о конденсации водяных паров на поверхностях металлической оснастки и изделий. Из-за незначительной величины первоначальной влажности воздуха камеры и наличия только одной открытой поверхности влагосодержание материала изделий практически не возрастает.

С началом разогрева изделий в них возникают градиенты температур, вызывающие поток тепла и термодиффузию влаги к внутренним слоям.

Так как открытые поверхностных слою за период формирования и транспортировки их к установкам для тепловой обработки успевают частично высохнуть, градиенты влагосодержаний направлены к внутренним слоям, т.е. противоположны градиентам температур.

При дальнейшем разогреве воздушной среды камеры и изделий влагосодержание воздуха повышается, что говорит о начале влагоудаления из изделий. Температура среды камеры растет интенсивнее температуры изделий, а ее влажность начинает увеличиваться только по истечении 50-60 минут после начала тепловой обработки. Повышение влагосодержания среды камеры до первоначальной величины можно отнести за счет испарения влаги с поверхностей металлических конструкций, на которых в начале процесса

происходила конденсация. Это время составляет 45-50 минут. Изделия в течение 45-50 минут разогреваются практически без удаления из них влаги, что способствует наступлению в поверхностном слое третьего периода твердения бетона - кристаллизационного упрочнения капиллярно-пористой структуры. К данному моменту температура слоя бетона у открытой поверхности изделия доходит до 50°C. К концу первого часа разогрева изделий поверхностный слой успевает пройти стадию структурообразования капиллярно-пористого тела и становится достаточно прочным, а в керамзитобетонных панелях устанавливаются самые большие градиенты температур, которые способствуют возникновению термодиффузионной разности давлений  $\Delta P_1^P$  направленной во внутрь изделия и сжатия воздуха, находящегося в порах. Кроме того, повышение температуры наружных слоев изделий приводит к повышению удельного объема воздуха и влаги, содержащихся в них, что в свою очередь создает дополнительную разность к внутренним слоям. Последнее еще больше увеличивает концентрацию влаги и воздуха и их давлений во внутренних слоях ( $\Delta P_4^P$ ), а также создает разность парциальных давлений сухого воздуха, направленную в сторону воздушной среды камеры и способствующую удалению воздуха из изделий.

Вследствие более быстрых процессов структурообразования во внешних слоях изделий контакция происходит интенсивнее и сопровождается образованием вакуума, т.е. возникновением дополнительной разности давлений  $\Delta P_3^P$ , направленной от внутренних слоев.

Таким образом, разности давлений  $\Delta P_1^P$  и  $\Delta P_2^P$  способствуют передвижению влаги во внутрь изделия, а  $\Delta P_3^P$  и  $\Delta P_4^P$  - и наружным слоям.

Как показывают исследования, в первый час нагрева изделий влагосодержание практически не изменяется и влага движется к внутренним слоям. Учитывая это, можно написать

$$(\Delta P_1^P + \Delta P_2^P) > (\Delta P_3^P + \Delta P_4^P).$$

Но при дальнейшем разогреве градиенты температур уменьшаются, а зона интенсивного структурообразования и контракции перемещается ближе к центру. Поэтому  $\Delta P_1^P$  и  $\Delta P_2^P$  уменьшаются, а разность гидродинамического давления влаги увеличивается. В конце концов наступает такой момент, когда  $(\Delta P_1^P + \Delta P_2^P) < (\Delta P_3^P + \Delta P_4^P)$  и влага начинает поступать к открытой поверхности изделий, что позволяет развиваться процессу кристаллизационного упрочнения поверхностных слоев изделий.

Наибольшее влагоудаление отмечается в течение 2-го часа тепловой обработки, которое доходит: в трехслойных панелях до 2,5 и в керамзитобетонных - 3,85% по массе. Здесь кривая влагоудаления имеет наибольший и постоянный уклон. На границе 2 и 3-го часов нагрева наклон кривой влагоудаления резко уменьшается и в течение 3-го часа нагрева носит линейный характер, что говорит о равенстве скоростей удаления влаги с поверхности и поступления ее из внутренних слоев.

После 3-го часа нагрева наклон кривой влагоудаления начинает постепенно уменьшаться.

Анализ экспериментальных данных показывает, что разогревание воздушной среды камеры и изделий выше 3 часов нецелесообразно, так как может наступить период переменной "сушки", приводящий к обезвоживанию материала изделий и деструктивным явлениям в них.

Дальнейшая тепловая обработка протекает при выключенной камере, что приводит к резкому падению температуры воздушной среды и уменьшению общего давления паровоздушной среды камеры и, тем самым, - к меньшему удалению водяных паров из нее в помещение цеха. Это позволяет резко увеличить влагосодержание (до 191 г/кг сух.воз.) и действительное парциальное давление водяных паров, содержащихся в воздухе камеры (до  $232 \cdot 10^2$  н/м<sup>2</sup>). В результате создаются внешние условия, препятствующие влагоудалению из изделий, что благоприятствует дальнейшим процессам структурообразования и кристаллического упрочнения бетона во всех слоях изделий.

Остаточное влагосодержание материала опытных образцов размером 220x200x250 мм составило: трехслойных - 2,1+2,7 и керамзитобетонных - 5,6+6,7% по массе.

В полупромышленной установке получены остаточные влагосодержания материала панелей: трехслойных из тяжелого бетона М-200 3,3-3,94 и керамзитобетонных М-100 6,6-8,4%, при тепловой обработке под копкаками стеновых форм, соответственно, 6,4-10 и 13,2-16%.

Результаты расчетов показывают, что после окончания тепловой обработки в изделиях остается достаточное количество свободной воды для дальнейшей гидратации цемента.

Сравнительно равномерное распределение температур и влагосодержания по всей массе панелей положительно сказывается на образовании однородной структуры цементного камня, не вызывает внутренних напряжений, и поэтому появление трещин или вздутий в верхних слоях пане-

лей не наблюдается. Испытание контрольных кубиков показало, что они имеют требуемую распалубочную прочность. Изделия как из тяжелого бетона марки 200, так и из керамзитобетона марки 100, прошедшие тепловую обработку в электроиндукционной камере с теплоизлучающими поверхностями, имели более высокую прочность на сжатие по сравнению с изделиями, твердевшими в естественных условиях и прошедших тепловую обработку под колпаками стендовых форм. Показатели морозостойкости аналогичны показателям прочности.

Вследствие незначительного остаточного влагосодержания керамзитобетонных изделий продолжительность их охлаждения в естественных условиях составляет 9-10 часов вместо 22-25 при тепловой обработке под колпаками стендовых форм.

Резюмируя изложенное выше, можно сказать, что в камере с теплоизлучающими поверхностями для твердения тяжелого и легких бетонов на пористых заполнителях создаются благоприятные условия, позволяющие получать изделия с допустимой остаточной влажностью при резком сокращении сроков тепловой обработки без снижения их физико-механических качеств, автоматизировать процесс тепловой обработки, а также резко улучшить условия труда в помещениях цеха.

Кроме того, применяя специальные средства защиты от увлажнения панелей при складском хранении, транспортировке и монтаже, уже в I-й год эксплуатации можно получить влагосодержание материала стен жилых зданий, но превышающее равновесное. Это позволит сократить сроки строительства и его стоимость, а также резко улучшить санитарно-гигиенические условия в жилых помещениях, снизить расход тепла на отопительно-вентиляционные цели и повысить долговечность ограждающих конструкций зданий.

#### Глава 7. Анализ технико-экономических показателей.

Как было сказано выше, качество и стоимость панелей и эксплуатация зданий находятся в прямой связи с величиной производственного остаточного влагосодержания, снижение которого требует значительных материальных затрат и времени. Поэтому внедрение новых методов тепловой обработки или мероприятий по улучшению существующих, позволяющих значительно снизить производственную остаточную влажность материала изделий, сроки их изготовления и заводскую себестоимость, дает большой экономический эффект.

Анализ технико-экономической эффективности произведен нами по двум основным направлениям:

1) уменьшение производственного остаточного влагосодержания материала панелей из керамзитобетона, изготавливаемых агрегатно-поточным методом на заводе железобетонных изделий г.Светлогорска с тепловой обработкой в ямных камерах при непосредственном соприкосновении влажного пара с изделием;

2) замена тепловой обработки под колпаками стендовых форм наружных стеновых панелей трехслойной конструкции из тяжелого бетона с утеплителем из минераловатных мат тепловой обработкой в электроиндукционных установках с теплоизлучающими поверхностями.

Анализ технико-экономической эффективности снижения остаточного производственного влагосодержания керамзитобетона панелей наружных стен произведен по методике Л.Д.Богуславского для 90-квартирного жилого дома серии I-464А, имеющего общую площадь наружных стен 3170 м<sup>2</sup>, а за вычетом оконных проемов - 2330.

В соответствии со СНиП П-А.6-62 для климатических условий г.Светлогорска расчетные параметры наружного воздуха составляют: самых холодных суток - 27, пятидневки - 22, за отопительный период - I,2<sup>0</sup>C, продолжительность отопительного периода - 4680 ч/год.

Результаты расчетов требуемых величин термического сопротивления и толщины наружной стены из керамзитобетона при различных влагосодержаниях приведены в табл. I.

Таблица I

Влаго- содер- жание керам- зито- бето- на па- нели W, % по массе	Коэффициент теплопровод- ности λ, ккал/м <sup>2</sup> ·град·ч	Величина капиталь- ных vlo- жений, связан- ных с толщиной огражде- ния, руб/м <sup>2</sup> огр	Оптималь- ное тер- мическое сопротив- ление ог- раждения, м <sup>2</sup> град·ч/ккал	Толщина панели, опреде- ленная по		Действительное сопротивление ограждения R <sub>0</sub> , м <sup>2</sup> ·град·ч/ккал	
				R <sub>0</sub> <sup>тр</sup>	R <sub>0</sub> <sup>опт</sup>	по δ <sup>тр</sup>	по δ <sup>опт</sup>
18	0,384	8,12	1,20	0,35	0,40	1,136	1,267
12	0,356	7,0	1,28	0,30	0,40	1,072	1,352
6	0,30	5,89	1,41	0,25	0,35	1,069	1,402

Примечание: расчетные температуры внутреннего воздуха t<sub>в</sub> = 18, наружного для ограждения средней массивности - 24,5<sup>0</sup>C; эксплуатационные расходы, связанные с толщиной ограждения B=0,27' руб/м<sup>2</sup> ограждения в год; требуемое термическое сопротивление R<sub>0</sub><sup>тр</sup> = 1,023 м<sup>2</sup>·ч·град/ккал.

Результаты расчета технико-экономических показателей снижения остаточной производственной влажности керамзитобетонных панелей наружных стен для одного 90-квартирного жилого дома серии I-464A приведены в табл.2.

Таким образом, в результате снижения остаточной производственной влажности керамзитобетона панелей наружных стен можно сэкономить только по одному дому от 6890 до 12698 руб/год.

Эта экономия по мере увеличения срока эксплуатации будет уменьшаться, но никогда не снизится до нуля, так как с высыханием стен снижаются только эксплуатационные затраты, а первоначальные капитальные вложения остаются те же.

Таблица 2

Влагосодержание керамзитобетона панелей $W$ , % по массе	Приведенные затраты, руб/м <sup>2</sup> год		Полная стоимость $S_{огр}^{полн}$ 2330 м <sup>2</sup> стен, руб/год		Увеличение стоимости по сравнению со стоимостью при $W = 6\%$ , руб/год	
	по $R_o^{TP}$	по $R_o^{онт}$	по $R_o^{TP}$	по $R_o^{онт}$	по $R_o^{TP}$	по $R_o^{онт}$
	18	32,07	34,05	74723	79336	12698
12	29,58	33,43	68921	77992	6891	7906
6	26,62	30,08	62025	70086	-	-

Анализ технико-экономической эффективности тепловой обработки изделий в установках с теплоизлучающими поверхностями произведен с учетом производственного опыта применения этого метода в течение более 3-х лет, практических величин расхода и стоимости электроэнергии и пара, а также планово-нормативных данных.

В соответствии с Руководством по технико-экономической оценке способов формования бетонных и железобетонных изделий и другими нормативными указаниями основными сопоставимыми показателями являются сокращения:

- 1) продолжительности процесса тепловой обработки и увеличения за счет этого съема изделий с 1 м<sup>2</sup> производственных площадей;
- 2) затрат на энергию, необходимую для тепловой обработки;
- 3) удельных капитальных вложений и амортизационных отчислений;
- 4) заработной платы.

Для наглядности полученные результаты расчетов сведены в табл. 3.

Таблица 3

Сводная таблица технико-экономических показателей

Показатели	Единица измерения	Паропрогрев под колпаками стендовых форм	Тепловая обработка в установках с теплоизлучающими поверхностями
Продолжительность цикла тепловой обработки	ч	8	6
Продолжительность общего цикла формования панелей	то же	13,43	9,715
Оборачиваемость форм в сутки	раз	1,7	2,4
Съем продукции с 1 м <sup>2</sup> производственной площади	м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> год	8,7	12,3
Стоимость расхода электроэнергии	руб/м <sup>3</sup>	0,58	2,33
Стоимость расхода пара	то же	1,61	-
Удельные капитальные вложения	"	20,23	14,05
Амортизационные отчисления	"	3,19	1,45
Расход зарплаты	"	5,23	4,85
Заводская себестоимость	"	42,60	38,77

Годовая экономическая эффективность от внедрения тепловой обработки в электроиндукционных установках с теплоизлучающими поверхностями по сравнению с тепловой обработкой паром под колпаками стендовых форм нами определена по выражению

$$\mathcal{E} = (P_{ст.ф} - P_n)P = \left[ (C_{ст.ф} - C_n) + E(K_{ст.ф} - K_n) \right], \quad (15)$$

- где  $\mathcal{E}$  - годовая экономическая эффективность, руб/год;  
 $P_n$  - приведенные затраты на 1 м<sup>3</sup> изделия при тепловой обработке в электроиндукционной установке с теплоизлучающими поверхностями, руб/м<sup>3</sup>;  
 $P_{ст.ф}$  - приведенные затраты на 1 м<sup>3</sup> изделий при тепловой обработке паром под колпаками стендовых форм, руб/м<sup>3</sup>;  
 $C_n$  - себестоимость 1 м<sup>3</sup> панелей при тепловой обработке в предлагаемой установке, руб/м<sup>3</sup>;

$C_{ст.ф}$  - себестоимость 1 м<sup>3</sup> панелей при тепловой обработке паром под колпаками стендовых форм, руб/м<sup>3</sup>;

$K_n$  - удельные капитальные вложения по предлагаемой технологии, руб/м<sup>3</sup>;

$K_{ст.ф}$  - удельные капитальные вложения по стендовой технологии, руб/м<sup>3</sup>;

$E$  - нормативный коэффициент эффективности, равный для промышленности строительных материалов 0,12;

$P$  - годовая производительность при предлагаемой технологии, равная 35900 м<sup>3</sup>/год.

$$\begin{aligned} \Phi &= [(42,60 - 38,77) + 0,12 (20,23 - 14,05)] 35900 = 4,58 \times 35900 = \\ &= 164,4 \text{ тыс.руб. в год.} \end{aligned}$$

При тепловой обработке в туннельной электроиндукционной камере с теплоизлучающими поверхностями расход электроэнергии на 1 м<sup>3</sup> изделий может быть доведен до 45-50 квт·ч, что позволит повысить эффективность предлагаемого способа. Кроме того, при тепловой обработке в установках с теплоизлучающими поверхностями улучшаются условия труда, повышается качество изделий, сокращается цикл их изготовления и улучшаются эксплуатационные качества зданий.

По разделу II в работе даются выводы, содержание которых сводится к следующему:

1. Тепловая обработка как тяжелых, так и легких бетонов в камере с теплоизлучающими поверхностями происходит при небольших градиентах температур в изделиях и при достаточно высоком влагосодержании воздушной среды установки, позволяющем регулировать процесс влагоудаления в течение всего цикла тепловой обработки получать изделия с хорошими физико-механическими качествами.

2. В заводских и полигонных условиях производства стеновых панелей первую стадию структурообразования бетон проходит при формировании и транспортировке; при этом потеря свободной влаги происходит не только в результате химического связывания ее с материалом в процессе гидратации цемента, но и испарения и механической утечки при перевозке бетонной массы, формировании панелей и их транспортировке и загрузке в установку для тепловой обработки.

3. В период тепловой обработки основное влияние на влагоудаление оказывают разность парциальных давлений водяного пара на поверхности изделий и в среде камеры, величина теплового потока, воспринимаемого изделием от нагретых поверхностей установки, и степень герметичности последней.

4. Снижение производственной отпускной влажности материала стеновых панелей резко сократит приведенные затраты на  $1 \text{ м}^2$  стены здания: например, при уменьшении влагосодержания керамзитобетонных панелей наружных стен жилого дома серии 1-464А с 12 до 6% по массе при определении толщины стены по  $R_0^{TP}$  на 2,96 руб/ $\text{м}^2$  огр. и по  $R_0^{онт}$  - на 3,35. Кроме того, сокращается продолжительность тепловой обработки панелей из тяжелых бетонов до 6 часов, керамзитобетонных - до 5 и многопустотных плит перекрытий и дренажных колец - до 3,5-4, что увеличивает съем продукции с  $1 \text{ м}^2$  производственных площадей.

5. Рекомендуемые режимы тепловой обработки позволяют получать изделия без деструктивных явлений и с отпускной прочностью в пределах 70-75% марочной. Их прочностные показатели в 7-и и 28-суточном возрасте оказались выше, чем при тепловой обработке в среде влажного насыщенного пара, и не ниже показателей изделий, твердевших в нормальных естественных условиях. Такие же результаты получены по морозостойкости.

6. В разработанных конструкциях электроиндукционных установок с теплоизлучающими поверхностями коэффициент мощности может достигать 0,9, а расход электроэнергии: в установках периодического действия - 70, а в камерах непрерывного действия (туннельные и щелевые камеры) - 45-50 квт·ч/ $\text{м}^3$  изделия.

Работа заканчивается общими выводами, содержание которых сводится в следующем:

1. Современное крупнопанельное и крупноблочное строительство жилых зданий развивается по пути применения однослойных панелей наружных стен из легких бетонов на пористых заполнителях, особенно из керамзитобетона. В то же время следует отметить, что послепостроечное влагосодержание материала наружных стен жилых зданий из панелей и крупных блоков стало не меньше, чем стен из кирпича, а в некоторых случаях даже увеличилось. Наибольшее количество влаги, составляющее 55-75% общего послепостроечного, вносится в панели и блоки в процессе заводского изготовления.

2. Влагосодержание материала панелей отрицательно влияет на процесс тепловой обработки и окончательной заводской отделки, на теплофизические и прочностные свойства, а также на себестоимость и сроки строительства жилых зданий.

3. "Мокрые" способы тепловой обработки бетонов, применяемые на большинстве заводов железобетонных изделий, не позволяют получать изделия с отпускным влажосодержанием материала, равным или незначительно превышающим эксплуатационно-равновесное. Этому отвечают "сухие" способы, при применении которых изделие дополнительно не увлажняется, а, наоборот, высушивается.

Анализ физико-химических и тепло- и массообменных процессов, происходящих при твердении бетонов, показал, что тепловая обработка в "сухой" среде не может существенно влиять на состав продуктов гидратации.

5. На кинетику структурообразования цементного камня большое влияние оказывают способ подвода тепла к изделиям и процессы миграции влаги в них. Поэтому при создании определенных тепловлажностных состояний среды установки и перепадов температур в изделиях можно добиться перемещения влаги в нужном направлении и обеспечить при этом ее доступ к зернам цемента во всей массе бетона и на всех стадиях тепловой обработки.

6. Разработан, теоретически обоснован, экспериментально проверен и внедрен в производство метод тепловой обработки бетона и железобетона в камерах с теплоизлучающими поверхностями, позволяющий получать изделия с хорошими физико-механическими свойствами и требуемым влажосодержанием.

7. Полученные технико-экономические показатели показывают экономическую целесообразность применения тепловой обработки панелей наружных стен в электроиндукционных установках с теплоизлучающими поверхностями. Установку такого типа наиболее целесообразно сооружать в виде туннельной камеры, а изделия располагать в ней в один ярус. В этом случае обеспечиваются наиболее оптимальные условия тепло- и массообмена между греющими поверхностями и изделием.

8. Предложенным методом может производиться также тепловая обработка плит перекрытий, вентиляционных блоков, дренажных труб, изделий добора и других как из тяжелого, так и из легких бетонов. Особенно большой технико-экономический эффект можно получать при изготовлении панелей из легких бетонов на пористых заполнителях с сочетанием предварительного электропрогрева бетонной массы с последующим выдерживанием изделий в предлагаемых установках.

9. В результате исследований и некоторого опыта проектирования и эксплуатации полупромышленных и лабораторных установок был

разработан проект инструкции по применению электроиндукционных установок с теплоизлучающими поверхностями, которая включена НИИЖБ Госстроя СССР в общую инструкцию по тепловой обработке бетонных и железобетонных изделий с использованием электрической энергии.

10. Разработана и теоретически обоснована новая методика экспериментальных исследований зависимости и воздухопроницаемости материалов и конструкций от их влагосодержания.

11. На основании опытных данных получены эмпирические уравнения, связывающие фильтрационные потоки, влагосодержание и объемную массу керамзитобетона и перепад давлений воздушной среды, а также построены номограммы, позволяющие с достаточной точностью производить инженерные расчеты.

12. В результате анализа существующих эмпирических уравнений автором предложена обобщающая формула зависимости коэффициента теплопроводности ячеистых и легких бетонов на пористых заполнителях от их объемной массы, температуры и влагосодержания.

13. Нормируемая Строительными Нормами и Правилами (СНИП П-А.7-62) влажность материала конструкции из легких бетонов намного превышает эксплуатационно-равновесную и не отвечает современному уровню развития строительной науки и техники. Вследствие этого при разработке новых нормативных документов необходимо снизить отпускную влажность большинства крупнопанельных изделий заводского изготовления и пересмотреть в сторону уменьшения величины допустимых влажностей материалов ограждений в процессе их эксплуатации.

Результаты исследований неоднократно докладывались на Всесоюзных конференциях, координационных совещаниях секции тяжелых бетонов и методов тепловой обработки Совета по координации научно-исследовательских работ в области бетона и железобетона Госстроя СССР, экспонировались на Выставке достижений народного хозяйства СССР, а также используются автором и другими сотрудниками кафедры строительной физики и использования тепла в строительном производстве Белорусского политехнического института при ведении учебных занятий по курсам "Строительная теплофизика" и "Тепловые установки заводов КИД" со студентами специальностей строительного и технологического профилей.

Основные положения диссертации отражены в следующих опубликованных работах:

1. Солдаткин М.Т., Акельев В.Д. Тепловлажностный режим наружных стен жилых домов из силикатного кирпича и силикатных блоков в клима-

тических условиях БССР. Труды межвузовской конференции. Минск, "Высшая школа", 1964.

2. Солдаткин М.Т. Некоторые результаты экспериментального исследования конструкций наружных стен зданий с высокой влажностью и высокой температурой воздуха помещений. Сб. научных трудов БПИ, вып. 44, Минск, изд-во АН БССР, 1954.

3. Солдаткин М.Т., Маслаков А.Д. Влияние технологических факторов на качество керамзитобетонных панелей. Сб. обмена опытом и технической информации МС БССР, № 1, 1966.

4. Солдаткин М.Т., Маслаков А.Д. Некоторые результаты исследований тепловой обработки керамзитобетонных панелей. Сб. трудов БПИ, Минск, 1967.

5. Солдаткин М.Т., Гинц Б.К. Микроклимат помещений и теплозащитные качества наружных стен жилых домов из аглопоритобетонных блоков. "Известия высших учебных заведений - Строительство и архитектура", 1965, № II.

6. Солдаткин М.Т., Сычев А.Т. Исследование электропроводности кирпича в зависимости от влажности. Сб. научных трудов БПИ, выпуск 74, Минск, изд-во АН БССР, 1959.

7. Солдаткин М.Т., Акельев В.Д. Метод определения влажности строительных материалов путем поляризации электронов. Сб. научных трудов БПИ, № 1, 1967.

8. Солдаткин М.Т., Бензарь В.К. Переносный влагомер для определения влажности строительных материалов по поглощению СВЧ. "Промышленность Белоруссии", 1967, № 7.

9. Солдаткин М.Т., Маслаков А.Д. Явления, происходящие в керамзитобетонных панелях при тепловой обработке. "Сельское строительство", 1967, № I.

10. Маслаков А.Д., Солдаткин М.Т. Пути снижения остаточной влажности керамзитобетонных панелей. Труды Всесоюзной юбилейной IV межвузовской конференции по вопросам совершенствования крупнопанельного строительства, Днепропетровск, 1967.

11. Будько С.К., Солдаткин М.Т. Выбор режима термообработки бетонных и железобетонных панелей в камере с излучающими поверхностями. Труды Всесоюзной юбилейной IV межвузовской конференции по вопросам совершенствования крупнопанельного строительства, Днепропетровск, 1967.

12. Солдаткин М.Т., Маслаков А.Д. Влияние влажности керамзитобетонных изделий на продолжительность их прогрева при тепловлажностной обработке. "Бетон и железобетон", 1968, № 5.

13. Солдаткин М.Т., Акельев В.Д., Пестрикова Т.Б. Результаты исследования измерения влажности строительных материалов путем поляризации электродов. Труды научно-технической конференции "Радиотехнические методы контроля в строительной индустрии". Минск, 1970.

14. Солдаткин М.Т., Будько С.К. Термообработка панелей наружных стен в электроиндукционной установке. Изд-во литературы по строительству, М., 1968.

15. Солдаткин М.Т., Будько С.К. Работает лучистая энергия. "Промышленность Белоруссии", 1969, № 2.

16. Солдаткин М.Т., Будько С.К. Новое в тепловой обработке панелей наружных стен. Сб. "Обмен опытом и технической информации", № 1, Минск, "Полымя", 1967.

17. Будько С.К., Солдаткин М.Т. Установка для тепловой обработки бетона индукционными токами". Сб. "Обмен опытом и технической информацией", № 3, Минск, "Полымя", 1966.

18. Будько С.К., Солдаткин М.Т. Результаты исследований режимов термообработки стеновых панелей в электроиндукционной установке. Сб. "Обмен опытом и технической информацией", № 1, Минск, "Полымя", 1968.

19. Солдаткин М.Т., Нестеров Л.В., Шалак А.Д. Некоторые вопросы тепло- и массообмена в электроиндукционной установке при термообработке бетонных и железобетонных изделий. Труды республиканской научно-технической конференции "Тепловлажностная обработка бетонных и железобетонных конструкций и пути повышения ее эффективности", Киев, 1968.

20. Солдаткин М.Т., Шалак А.Д., Нестеров Л.В. К вопросу расчета электроиндукционных установок для тепловой обработки бетонов. Труды республиканской научно-технической конференции, Киев, 1968.

21. Будько С.К., Солдаткин М.Т. Термообработка панелей в электроиндукционной камере с излучающими поверхностями. "Бетон и железобетон", 1970, № 2.

22. Солдаткин М.Т., Будько С.К. Экономическая эффективность применения термообработки панелей наружных стен в электроиндукционной камере с излучающей поверхностью. Труды республиканской научно-технической конференции, Киев, 1968.

23. Солдаткин М.Т., Будько С.К., Нестеров Л.В., Шалак А.Д. Некоторые результаты исследований термообработки керамзитобетонных панелей в электроиндукционной установке. Легкие и силикатные бетоны, Минск, "Высшая школа", 1969.

24. Нестеров Л.В., Солдаткин М.Т., Шалак А.Д. Некоторые результаты исследований температурных полей в стеновых панелях при термообработке их в камерах с теплоизлучающими поверхностями. Труды Всесоюзной юбилейной XV межвузовской конференции по вопросам совершенствования крупноэлементного строительства, Днепропетровск, 1967.

25. Солдаткин М.Т., Баранов С.П., Лебедев А.П. Термообработка тяжелых бетонов в электроиндукционной камере с теплоизлучающими поверхностями. Тезисы докладов Ю-й научно-технической конференции БИИЖТа и ДорНТО, Гомель, 1970.

26. Лебедев А.П., Солдаткин М.Т., Баранов С.П. Тепло- и массообмен при термообработке тяжелых бетонов в электроиндукционной камере с теплоизлучающими поверхностями. Тезисы докладов Ю-й научно-технической конференции БИИЖТа и ДорНТО, Гомель, 1970.

27. Солдаткин М.Т., Баранов С.П., Лебедев А.П. Физико-механические свойства железобетонных изделий, подвергнутых термообработке в электроиндукционной камере с теплоизлучающими поверхностями. Тезисы докладов Ю-й научно-технической конференции БИИЖТа и ДорНТО, Гомель, 1970.

28. Солдаткин М.Т., Шалак А.Д. Расчет электроиндукционных установок с теплоизлучающими поверхностями. "Известия высших учебных заведений - Энергетика", 1969, № II.

29. Солдаткин М.Т., Шалак А.Д. Некоторые вопросы проектирования электроиндукционных камер с теплоизлучающими поверхностями для тепловой обработки бетона. "Известия АН БССР", серия физико-энергетических наук, 1971, № I.