

На правах рукописи

*Козлов*

**Козлов Владимир Владимирович**

**МЕТОД ИНЖЕНЕРНОЙ ОЦЕНКИ ВЛАЖНОСТНОГО  
СОСТОЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ  
КОНСТРУКЦИЙ С ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ ТЕПЛОЗАЩИТЫ  
ПРИ УЧЕТЕ ПАРОПРОНИЦАЕМОСТИ, ВЛАГОПРОВОДНОСТИ И  
ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА**

Специальности: 05.23.01 — Строительные конструкции,  
здания и сооружения  
05.23.03 — Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха,  
газоснабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2004 г.

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук

Научный руководитель

доктор технических наук

Гагарин В.Г.

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор

Александровский С.В.

кандидат технических наук, доцент

Тертичник Е.И.

Ведущая организация - ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко

Защита состоится 30 июня 2004 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 007.001.01 при Научно-исследовательском институте строительной физики по адресу: 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, светотехнический корпус. Тел. 482-40-76, факс 482-40-60.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом фонде НИИ строительной физики

Автореферат разослан 28 мая 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



В.К. Савин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Влажностный режим ограждающих конструкций определяет их эксплуатационные свойства, долговечность и экологичность. Проведение энергосбережения в строительстве вызвало быстрое развитие строительных технологий, использование новых конструктивных решений и материалов. Практически все современные наружные ограждающие конструкции выполняются многослойными, с применением эффективных теплоизоляционных материалов. Такие решения ограждений требуют более внимательного рассмотрения и учета их влажностного режима.

Современные методы прогнозирования влажностного режима ограждающих конструкций предполагают знание большого числа характеристик строительных материалов, использование специальных программ для ЭВМ и не дают проектировщику ясного представления о происходящих в конструкции влажностных процессах. Методы расчета, доступные широкому кругу инженеров и представленные в нормах, учитывают единственный механизм влагопереноса — паропроницаемость, что в ряде случаев явно недостаточно и может привести к ошибочным результатам. В частности, они не учитывают перенос жидкой влаги и фильтрацию влажного воздуха. Этим определяется актуальность разработки более общего инженерного метода расчета влажностного состояния ограждающих конструкций и последующего использования этого метода при прогнозировании теплозащиты ограждающих конструкций вследствие изменения влажностного состояния материалов, из которых они состоят.

**Основной целью работы** является:

*Разработка инженерного метода расчета влажностного состояния ограждающих конструкций, с учетом паропроницаемости, теплопроводности и фильтрации воздуха.*

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ разработанных ранее методов расчета влажностного режима ограждающих конструкций;
- разработать потенциал влажности, который линеаризует уравнение стационарного влагопереноса и рассчитывается по традиционно определяемым влажностным характеристикам строительных материалов;
- составить математическую модель влагопереноса в ограждающей конструкции с использованием введенного потенциала, учитывающую паропроницаемость, теплопроводность и фильтрацию воздуха;
- разработать аналитический метод решения уравнений составленной математической модели при стационарных граничных условиях, с учетом переноса парообразной и жидкой влаги, а также фильтрации воздуха;
- разработать соответствующие инженерные методы оценки влажностного состояния ограждающих конструкций;
- экспериментально исследовать теплофизические характеристики ряда строительных материалов, в

вести расчеты зависи-

мостей потенциала влажности от температуры и влажности для материалов, применяемых в современном строительстве;  
 провести аналитические исследования влажностного режима ряда современных ограждающих конструкций.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

введен потенциал влажности  $F$ , и разработан метод его расчета по традиционно исследуемым характеристикам строительных материалов;  
 предложена математическая модель влагопереноса в ограждающих конструкциях, использующая введенный потенциал и учитывающая влагоперенос с фильтрующимся воздухом;  
 предложено уравнение для равновесных сверхсорбционных влажностей на стыке материалов в конструкции, полученное на основании теории стационарной влагопроводности;  
 разработан инженерный метод расчета влажностного состояния ограждающих конструкций, учитывающий паропроницаемость и влагопроводность и являющийся расширением на область сверхсорбционных влажностей материалов известного графоаналитического метода;  
 разработан метод расчета координаты плоскости максимального увлажнения в ограждающей конструкции;  
 разработан метод расчета предельно допустимой величины фильтрации воздуха через ограждение не приводящей к критическому ухудшению влажностного состояния конструкции.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

разработан инженерный метод расчета влажностного состояния ограждающих конструкций, учитывающий перенос парообразной и жидкой влаги;  
 разработан метод определения предельно допустимой воздухопроницаемости ограждающей конструкции;  
 экспериментально определены и проанализированы теплофизические характеристики ряда новых строительных материалов, в том числе особо легких бетонов;  
 составлены зависимости потенциала  $F$  от температуры и влажности материала, для ряда строительных материалов;  
 проведены расчеты влажностного состояния ряда современных ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты и сформулированы предложения по их совершенствованию.

**Внедрение результатов работы.**

Результаты работы использованы при разработке:

- Рекомендаций по составу и содержанию документов и материалов, представляемых для технической оценки пригодности продукции. Фасадные теплоизоляционные системы с воздушным зазором. М., Госстрой России, 2004;
- Альбома технических решений «Вентилируемые фасады системы ДИАТ», М., 2003.

Результаты работы непосредственно использованы при проектировании и ряда объектов.

### **Апробация работы.**

Основные результаты работы доложены на: шестой научно-практической конференции (академические чтения) «Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях», Москва, НИИСФ, 2001;

седьмой научно-практической конференции (академические чтения) «Актуальные проблемы строительной теплофизики», Москва, НИИСФ, 2002;

восьмой научно-практической конференции (академические чтения) «Стены и фасады. Актуальные проблемы строительной теплофизики», Москва, НИИСФ, 2003;

научно-практической конференции «Проблемы развития архитектуры и градостроительства в городе Уфе», Уфа, Министерство строительства, архитектуры и дорожного комплекса республики Башкортостан, 2002.

Основное содержание диссертации **опубликовано** в статьях и докладах, всего в 10 печатных работах.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы (136 наименований) и приложений. Общий объем работы **153 страниц**, из них **26** иллюстраций, текст, включая таблицы, занимает **140** страниц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** представлен анализ научных работ за последние 80 лет, посвященных исследованиям влажностного режима ограждающих конструкций. Отечественная школа теплофизиков в лице В.Д. Мачинского, О.Е. Власова, К.Ф. Фокина, Р.Е. Брилинга, А.У. Франчука, Э.Х. Одельского, Ф.В. Ушкова, В.Н. Богословского, А.В. Лыкова, С.В. Александровского, В.М. Ильинского, В.И. Лукьянова, Б.Ф. Васильева, А.И. Фоломина, А.П. Васьковского, В.Г. Гагарина, А.Г. Перехоженцева, Е.И. Тертичника и многих других разработала методы расчета влажностного режима ограждений и методы исследования влажностных характеристик строительных материалов.

Первым методом расчета влажностного состояния ограждающих конструкций был метод, опирающийся на модель перемещения водяного пара в конструкции при постоянных граничных условиях. Он был предложен К.Ф. Фокиным в конце 20-х годов. Метод позволял определять зону конденсации в ограждающей конструкции и рассчитывать влагонакопление при стационарных граничных условиях, он учитывал перенос влаги только паропроницаемостью с постоянным коэффициентом. Этот метод получил развитие в работах Э.Х. Одельского (расчет воздухопроницаемых покрытий), А.М. Шкловера, В.М. Ильинского (выбор граничных условий), Ф.В. Ушкова (метод фокусов для расчета многослойных ограждений), А.У. Франчука (для аналитического расчета требуемого сопротивления паропроницанию). Этот метод входил в СНИП «Строительная теплотехника» в качестве раздела «Сопротивление паропроницанию ограждающих конструкций» и не изменялся с 60-х годов XX века. Метод, аналогичный предложенному К.Ф. Фокиным, был разработан в ФРГ в кон-

це 50-х годов Н. Glaser'ом, который, вопреки сложившееся к тому времени системе понятий, использовал другое определение паропроницаемости. Он послужил основой для раздела «Защита от конденсации влаги в строительных конструкциях» немецких норм DIN 4108. В настоящее время метод Н. Glaser'a включен в нормы некоторых Западноевропейских стран.

Одновременно значительное развитие получили методы расчета нестационарного влажностного режима ограждений, которые учитывают различные механизмы влагопереноса (диффузию пара, изотермический перенос жидкой влаги, термовлагопроводность и т.д.), состояние влаги в строительных материалах (сорбционное и десорбционное увлажнение, содержание незамерзшей воды и т.д.) и нестационарность граничных условий (переменная температура и влажность воздуха, увлажнение конструкции жидкой влагой) Эти методы требуют знания многих характеристик строительных материалов и не позволяют неспециалисту понять особенности происходящих в конструкции процессов. Их практически невозможно использовать без ЭВМ, поэтому они реализованы в виде программ и позволяют проводить расчеты влажностного режима ограждающих конструкций в многолетнем цикле эксплуатации. В главе рассмотрены математические модели влагопереноса, используемые в нестационарных методах расчета.

По аналогии с термодинамикой для учета разнообразных механизмов влагопереноса в начале 1950-х годов В.Н. Богословским было введено понятие «потенциал влажности». Идея потенциала влажности, как единой меры увлажнения различных материалов оказала большое влияние на дальнейшее развитие исследований влагопереноса в материалах и конструкциях. Она была реализована в работах А.Г. Перехоженцева, *К.Киев'я* и др. для расчета нестационарного влажностного режима конструкций.

В.Г.Гагариным методами векторного анализа показана неоднозначность определения потенциала влажности и доказано, что влагоперенос, учитывающий паропроницаемость и теплопроводность может быть описан при помощи следующего потенциала влажности:

$$W = \mu + \int_0^{\zeta} \beta(\zeta) d\zeta$$

Такой подход открывает возможности построения потенциала влажности и расчета соответствующих характеристик на основании традиционно исследуемых в строительной теплофизике показателей строительных материалов.

Рассмотрены основные методики экспериментального определения влажностных характеристик строительных материалов. Одним из наиболее противоречивых является вопрос о равновесных влажностях на стыке материалов. Предложенные разными авторами методы расчета этой влажности дают не совпадающие, иногда противоположные по смыслу, результаты.

Необходимость модернизации существующих методов инженерной оценки влажностного состояния ограждающих конструкций вытекает из того, что физическая модель, лежащая в их основе учитывает единственный механизм влагопереноса - движение пара под действием градиента парциального давления. Этот, безусловно, важнейший механизм влагопереноса не единствен-

ный. Неучет остальных механизмов влагопереноса и другие упрощения приводят к ограничению области применимости существующих инженерных методов. Для конструкций с материалами с большими коэффициентами влагопроводности (кирпич, ячеистый бетон, пеногипс) эти методы применимы лишь для сорбционных влажностей материалов. Для современных конструкций со значительной воздухопроницаемостью (кладка из блоков), с вентилируемыми фасадными системами они неприменимы вовсе.

Проведенный анализ показал необходимость инженерного метода оценки влажностного состояния ограждающих конструкций, учитывающего механизмы переноса влаги влагопроводностью и фильтрацией воздуха.

Выполненный обзор позволил сформулировать задачи исследования.

**Во второй главе** диссертации рассматривается математическая модель влагопереноса. Проводятся ее преобразования, направленные на разработку инженерного метода расчета влажностного состояния конструкций.

Проведена оценка величин потоков влаги в конструкции. Получено, что поток парообразной влаги, обусловленный градиентом давления водяного пара, поток жидкой влаги, обусловленный градиентом влажности материала и поток влаги переносимой фильтрующимся воздухом сравнимы по величинам. Перенос жидкой влаги, обусловленный градиентом температуры, в условиях, характерных для эксплуатации ограждающих конструкций, незначителен по сравнению с указанными потоками. Уравнение влагопереноса в материале ограждающей конструкции, имеет вид:

$$\gamma_0 \frac{\partial w}{\partial \tau} = \text{div} [10^{-6} \mu \cdot \text{grad}(e) + 10^{-3} \beta \cdot \text{grad}(w) - 6,14 \cdot e \cdot G \cdot 10^{-6}] \quad (2)$$

Первое слагаемое в правой части представляет собой поток влаги, обусловленный градиентом парциального давления водяного пара, второе слагаемое — поток жидкой влаги, обусловленный градиентом влажности, третье слагаемое — поток влаги, обусловленный градиентом давления воздуха.

Выражение для потока влаги, обусловленного фильтрацией воздуха в (2), получено на основании уравнения:

$$\vec{j}_\phi = 3600 c_n \vec{v} \quad (3)$$

Уравнение (3) в принятых в строительной физике обозначениях принимает следующий вид:

$$j_\phi = 6,14 \cdot e \cdot G \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

С учетом рассматриваемых механизмов влагопереноса условия влагообмена на границах ограждающей конструкции записаны в следующем виде:

$$\begin{cases} \mu \cdot \text{grad}(e) + 1000\beta \cdot \text{grad}(w) - 6,14 \cdot e \cdot G \Big|_{s_n} = \frac{1}{R_n} (e - e_n) - 6,14 \cdot e_n \cdot G - 1000q_n \Big|_{s_n} \\ \mu \cdot \text{grad}(e) + 1000\beta \cdot \text{grad}(w) - 6,14 \cdot e \cdot G \Big|_{s_v} = \frac{1}{R_n} (e - e_n) - 6,14 \cdot e_n \cdot G - 1000q_n \Big|_{s_n} \end{cases} \quad (5)$$

Индексы «в» и «н» обозначают внутреннюю и наружную поверхность ограждающей конструкции соответственно.

Условия на стыках различных материалов в конструкции следующие:

- равенство потоков влаги:

$$\begin{aligned} & (\mu \cdot \text{grad}(e) + 1000 \beta \cdot \text{grad}(w) - 6,14 \cdot e \cdot G)_{s_0} = \\ & = (\mu \cdot \text{grad}(e) + 1000 \beta \cdot \text{grad}(w) - 6,14 \cdot e \cdot G)_{s_1} \end{aligned} \quad (6)$$

- уравнение равновесной влажности материалов:

$$w_i|_{x=\delta_{1i}} = f(w_2)|_{x=\delta_{2i}} \quad (7)$$

Уравнение равновесия влажностей на стыке материалов (7) записано в наиболее общем виде, так как оно требует уточнения.

Начальные условия принимаются в зависимости от решаемой задачи.

Вместе с уравнением влагопереноса (2) уравнения (5) - (7) составляют математическую модель влагопереноса в ограждающей конструкции.

Рассмотренное уравнение (2) линеаризуется при помощи потенциала влажности вида (1), однако он измеряется в единицах плотности потока влаги, что затрудняет использование аналитического решения уравнения. Предложен потенциал влажности, который позволяет линеаризовать правую часть уравнения (2) и измеряется в единицах давления:

$$F(w, T) = \frac{10^3}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta + E(T) \varphi(w) \quad (8)$$

Очевидно, что это потенциал влажности, так как он зависит только от свойств материала. Предложено называть такой потенциал — потенциалом  $F$ .

Введено эквивалентное дополнительное давление,  $h$ , Па, обусловленное влагопроводностью материала, которое определяется формулой:

$$h(w) = \frac{10^3}{\mu} \int_0^w \beta(\zeta) d\zeta \quad (9)$$

Градиент эквивалентного дополнительного давления определяет поток жидкой влаги в материале численно равный потоку парообразной влаги, обусловленному таким же по величине градиентом парциального давления водяного пара. По аналогии с относительным давлением водяного пара введено понятие *относительного дополнительного давления*:

$$\psi(w) = \frac{h(w)}{H} \quad (10)$$

где  $H = h(w_{\max})$  - максимальное эквивалентное дополнительное давление, Па.

В рамках теории стационарной влагопроводности выведено условие равновесия влажностей на стыке двух материалов в сверхсорбционной зоне:  $\psi_1 = \psi_2$ . Введение относительного дополнительного давления позволило получить единое условие на стыке двух материалов, как в сорбционной, так и в сверхсорбционной зоне:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \psi_1 = \psi_2 \end{cases} \quad (11)$$

Следует отметить, что как введенный потенциал  $F$ , так и максимальное эквивалентное дополнительное давление  $H$ , являются индивидуальными для каждого материала. Относительное дополнительное давление,  $\psi$ , позволяет со-

отнести равновесные влажности материалов и построить изотермы  $w(\psi)$ , которые являются аналогом изотерм сорбции  $w(\varphi)$ . Потенциал влажности  $F$ , можно представить формулой:

$$F(w, T) = H \cdot \psi(w) + E(T) \cdot \varphi(w) \quad (12)$$

В диссертации проведено исследование свойств потенциала  $F$ . Разработан метод построения шкалы потенциала  $F$  по традиционно используемым в строительной теплофизике характеристикам материала. Для построения зависимости потенциала  $F$  от влажности и температуры, необходимо знание коэффициентов паропроницаемости, влагопроводности и изотермы сорбции или десорбции водяного пара материала.

Для разработки инженерного метода принятая математическая модель влагопереноса сформулирована для одномерного стационарного случая с использованием потенциала  $F$ . При этом уравнение влагопереноса имеет вид:

$$\frac{d}{dx} \left[ \mu \cdot \frac{dF}{dx} - 6,14 \cdot e \cdot G \right] = 0 \quad (13)$$

Выполнено упрощение уравнений математической модели. Введены понятия *эффективных сопротивлений влагообмену*,  $R_n'$  и  $R_s'$ , и *эквивалентных потенциалов воздуха*,  $F_n$  и  $F_s$ , на границах ограждающей конструкции сделан переход от переменной  $x$  - координаты плоскости в конструкции, к переменной  $R^n(x)$  - сопротивлению паропроницаанию слоя конструкции до той же плоскости.

Эффективные сопротивления влагообмену на границах конструкции определяются по формулам:

$$\frac{1}{R_n'} = \frac{1}{R_n} + 6,14 \cdot G \quad \frac{1}{R_s'} = \frac{1}{R_s} - 6,14 \cdot G \quad (14)$$

Эквивалентный потенциал воздуха определяется как потенциал материала, при котором отсутствует влагообмен на границе конструкции с воздухом. Т.е.

$$F_n = \left( e_n + 1000q_n R_n' \right) \quad F_s = \left( e_s + 1000q_s R_s' \right) \quad (15)$$

Из определения следует, что формулы (15) имеют смысл только для эквивалентных потенциалов, которые меньше давления насыщенного водяного пара при температурах на границах ограждающей конструкции.

$R^n(x)$  — сопротивление паропроницаемости части конструкции, расположенной между наружным воздухом и плоскостью с координатой  $x$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ ,

$$R^n(x) = R_n + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{\delta_i}{\mu_i} + \frac{x - \sum_{i=1}^{m-1} \delta_i}{\mu_m} \quad (16)$$

где  $m$  — номер слоя конструкции содержащего точку с координатой  $x$ .

Для удобства записи уравнений введено обозначение  $R = R^n(x) - R_n$ .

Переход к новой переменной  $R$  позволил получать решения уравнения (13) в линейном виде, что в свою очередь позволило существенно упростить как поиск, так и дальнейшее использование аналитических решений описанной математической модели влагопереноса.

Математическая модель влагопереноса принимает следующий вид.

Уравнение влагопереноса:

$$\frac{d}{dR} \left[ \frac{dF}{dR} - 6,14 \cdot e \cdot G \right] = 0 \quad (17)$$

Граничные условия на наружной и внутренней поверхностях соответственно:

$$\left. \frac{dF}{dR} \right|_{x=0} = \frac{l}{R_n} (e(F, T) - F_n) \quad \left. \frac{dF}{dR} \right|_{x=\delta} = -\frac{l}{R_{en}} (e(F, T) - F_e) \quad (18)$$

Условия на стыке материалов:

$$\left. \frac{dF_1}{dR} \right|_{x=\delta_1-0} = \left. \frac{dF_2}{dR} \right|_{x=\delta_1+0} \quad (19)$$

$$F_1 = \tilde{f}(F_2) \quad (20)$$

В зоне сорбционных влажностей материалов условие (20) записывается:

$$F_1|_{x=\delta_{12}} = F_2|_{x=\delta_{12}} \quad (21)$$

В зоне сверхсорбционных влажностей условие (20) записывается:

$$F_1 = a_{12} \cdot (F_2 - E) + E \quad (22)$$

Сформулированная математическая модель влагопереноса с использованием предложенного потенциала влажности (17) — (22), позволила перейти к разработке методов расчета и оценки влажностного состояния ограждающих конструкций.

**Третья глава** диссертации посвящена решению уравнений сформулированной математической модели. На основании полученных решений разработан графический метод расчета распределения влажности по толщине ограждающей конструкции, анализируется влажностный режим и выводятся критерии удовлетворительности влажностного режима.

В стационарном одномерном случае уравнение влагопереноса без учета фильтрации воздуха принимает вид:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial R^2} = 0 \quad (23)$$

Общее решение такого уравнения — это линейная функция:

$$F = A' \cdot R + B' \quad (24)$$

Из граничных условий требуется найти коэффициенты  $A'$  и  $B'$ .

В главе описан алгоритм нахождения распределения потенциала  $F$  по конструкции и перехода от этого распределения к распределению влажности для любых конкретных условий.

В ряде случаев задача упрощается и удается выписать частные решения в общем виде.

При влажности материалов на стыке меньше максимальной сорбционной из условий (19) и (21) следует, что решение в координатах сопротивления паропроницаемости не претерпевает разрывов или переломов, т.е. линейно. Это означает, что неизвестными являются только два коэффициента  $A'$  и  $B'$ , которые находятся при решении системы из двух алгебраических уравнений, дос-

твляемой граничными условиями. Решение этой системы уравнений приводит к следующим вариантам распределения потенциала  $F$  в конструкции:

- если влажность материалов на границах ограждения меньше соответствующих максимальных сорбционных:

$$F(x) = (F_* - F_*) \frac{R^n(x)}{R_0^n} + F_* \quad (25)$$

- если влажность материала на наружной границе ограждения больше максимальной сорбционной:

$$F(x) = F_* - (E_0 - F_*) \frac{R_0^n - R^n(x)}{R_n} \quad (26)$$

Формулы (25) и (26) позволяют упростить расчет распределения потенциала  $F$  и сформулировать аналог графоаналитического метода К.Ф.Фокина, дополнительно учитывающий процессы влагопроводности и увлажнения ограждающей конструкции жидкой влагой.

Если влажность материалов превосходит максимальную сорбционную лишь на одном стыке, решение претерпевает в месте стыка разрыв и требуется найти три коэффициента  $A', B_1'$  и  $B_2'$ , которые находятся при решении системы из трех алгебраических уравнений, формируемой граничными условиями и условием на стыке материалов. Решение этой системы уравнений приводит к следующим вариантам распределения потенциала  $F$  в конструкции:

- если влажности материалов на границах ограждения меньше соответствующих максимальных сорбционных:

$$\begin{cases} F(x) = \frac{a_{12}(F_* - E_{12}) + E_{12} - F_*}{R_0^n + (a_{12} - 1)(R_2 + R_{*n})} R^n(x) + F_* & 0 \leq x < \delta_{12} \\ F(x) = F_* - \frac{a_{12}(F_* - E_{12}) + E_{12} - F_*}{R_0^n + (a_{12} - 1)(R_2 + R_{*n})} (R_0^n - R^n(x)) & \delta_{12} \leq x \leq \delta \end{cases} \quad (27)$$

- если влажности материалов на наружной границе ограждения больше максимальной сорбционной:

$$\begin{cases} F(x) = \frac{1}{R_n} (E_0 - F_*) (R^n(x) - R^n(\delta_{12})) + E_{12} (1 - a_{12}) - a_{12} \left[ F_* - \frac{R_2 + R_{*n}}{R_n} (E_0 - F_*) \right] & 0 \leq x < \delta_{12} \\ F(x) = F_* - \frac{1}{R_n} (E_0 - F_*) (R_0^n - R^n(x)) & \delta_{12} \leq x \leq \delta \end{cases} \quad (28)$$

Полученные решения (25) - (28) используются в пятой главе диссертации для расчета влажностного режима ряда ограждающих конструкций.

Учет фильтрации воздуха через конструкцию приводит к усложнению уравнения влагопереноса. Однако в одномерном стационарном случае оно интегрируется. Благодаря проведенным преобразованиям (14) — (16) граничные условия при учете фильтрации не усложняются.

Вид общего решения уравнения (17) зависит от влажности материала.

Для влажностей материалов меньше максимальной сорбционной общее решение имеет вид:

$$F = C_{\delta} e^{\frac{6,14 \cdot G}{\mu} x} - \frac{1}{6,14 \cdot G} C_a \quad (29)$$

Для влажностей материалов больше или равных максимальной сорбционной общее решение имеет вид:

$$F = \frac{6,14 \cdot G}{\mu} \int_0^x E dx + \frac{C_a}{\mu} x + C_{\delta} \quad (30)$$

Коэффициенты  $C_a$  и  $C_{\delta}$  в уравнениях (29), (30) находятся из граничных условий и условий на стыке материалов.

В точках перехода от сверхсорбционных влажностей материала к сорбционным (переход с одного вида решения к другому) добавляются условия непрерывности потенциала  $F$  и потока влаги. С учетом непрерывности температуры, давления водяного пара и потока воздуха эти условия принимают вид:

- условие непрерывности потенциала  $F$

$$F_{сорб} = F_{сверхсорб} = E \Big|_{x=\delta_{\alpha}} \quad (31)$$

- условие непрерывности потока влаги

$$\frac{dF_{сорб}}{dx} \Big|_{x=\delta_{\alpha}+0} = \frac{dF_{сверхсорб}}{dx} \Big|_{x=\delta_{\alpha}-0} \quad (32)$$

В диссертации описан алгоритм нахождения распределения потенциала  $F$  по толщине конструкции и перехода от этого распределения к распределению влажности для любых конкретных условий.

Если влажность ни на одном из стыков материалов в конструкции не превосходит максимальной сорбционной, задача получает существенное упрощение и удается выписать часть решения в общем виде. Решение соответствующей системы уравнений приводит к следующим вариантам распределения потенциала  $F$  в конструкции:

- если влажности материалов на границах ограждения меньше соответствующих максимальных сорбционных:

$$F = \frac{(F_n - F_n') \left( \frac{R_n}{R_n'} e^{6,14 \cdot G \cdot R} - 1 \right)}{\frac{R_{an} R_n}{R_n' R_n} e^{6,14 \cdot G \cdot R} - 1} + F_n' \quad (33)$$

- если влажности материалов на наружной границе ограждения больше максимальной сорбционной решение в области ограждения с сорбционной влажностью материала находится по формуле:

$$F = \frac{R_{an}}{R_n'} \left( \frac{E_0}{6,14 \cdot G \cdot R_n} - \frac{F_n'}{6,14 \cdot G \cdot R_n} + F_n' \right) e^{-6,14 \cdot G \cdot (R_n - R)} - \frac{1}{6,14 \cdot G} \left( \frac{E_0}{R_n} - \frac{F_n'}{R_n'} \right) \quad (34)$$

Из формул (33) и (34) видно, что учет фильтрации воздуха через ограждающую конструкцию приводит к переходу от линейных решений к экспоненциальным. В работах Ф.В.Ушкова показано, что стационарное распределение

температуры по толщине ограждающей конструкции при учете влияния фильтрации воздуха также является экспоненциальным:

$$t = t_n + \frac{e^{0,279GR^m} - 1}{e^{0,279GR_0} - 1} (t_s - t_n) \quad (35)$$

Формулы (33) и (35) по своей структуре аналогичны. Так как оба процесса «экспоненциальны», можно приближенно сравнить их интенсивность, сравнивая коэффициенты в показателях экспоненты. Для этого вводится коэффициент  $\varepsilon$  равный отношению коэффициента в показателе экспоненты для распределения температуры к коэффициенту в показателе экспоненты для распределения потенциала  $F$ . Причем коэффициенты берутся при безразмерных переменных.

$$\varepsilon = \frac{0,279R_0}{6,14R_0^n} = 0,0454 \frac{R_0}{R_0^n} \quad (36)$$

Чем меньше введенная характеристика  $\varepsilon$ , тем меньше влияние фильтрации воздуха на перенос тепла по сравнению с влиянием на влагоперенос. При одинаковой величине термического сопротивления конструкции и сопротивления паропроницаемости, без сопротивлений влагообмену на границах, интенсивность влияния фильтрации на распределение температуры по конструкции в 22 раза слабее, чем влияние фильтрации на распределение парциального давления водяного пара.

Для каждой конкретной ограждающей конструкции коэффициент  $E$  имеет свое значение, однако можно с уверенностью сказать, что для подавляющего большинства конструкций он мал и влияние фильтрации воздуха на влажностный режим на порядок сильнее, чем на тепловой режим конструкции.

На основании свойств потенциала  $F$  предложен метод определения координаты плоскости наибольшего увлажнения, он основан на решении уравнения  $\frac{\partial w}{\partial x} = 0$ . Из полученного соотношения выводится уравнение для координаты плоскости наибольшего увлажнения конструкции. При этом возможны два случая:

Если на поверхностях ограждающей конструкции влажность меньше максимальной сорбционной, то координата плоскости наибольшего увлажнения находится из уравнения:

$$\frac{T^2}{E} = C_2 \frac{R_0^n (T_s - T_n)}{R_0 (F_s - F_n)} \cdot \frac{\mu}{\lambda} \quad (37)$$

Если на наружной поверхности ограждающей конструкции влажность больше максимальной сорбционной, то координата плоскости наибольшего увлажнения находится из уравнения:

$$\frac{T^2}{E} = C_2 \frac{R_n (T_s - T_n)}{R_0 (E_0 - F_n)} \cdot \frac{\mu}{\lambda} \quad (38)$$

Зависимость  $\frac{T^2}{E}$  от температуры протабулирована (табл.1). Таким образом, с учетом формул (37) или (38) по таблице 1 находится температура в точке максимума влажности, а значит и координата точки максимума влажности, так как они однозначно связаны и при расчете влажностного состояния конструкции распределение температуры считается известным.

Таблица 1.

Зависимость величины  $\frac{T^2}{E}$  от температуры.

$T, ^\circ\text{C}$	$\frac{T^2}{E}, \text{K}^2/\text{Па}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\frac{T^2}{E}, \text{K}^2/\text{Па}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\frac{T^2}{E}, \text{K}^2/\text{Па}$
-30	1554	-12	313,9	6	83,25
-27	1187	-9	245,4	9	69,27
-24	898,6	-6	193,2	12	57,89
-21	682,8	-3	153,15	15	48,65
-18	520,2	0	121,98	18	41,03
-15	403,4	3	100,36	21	34,74

Знание координаты максимума влажности в конструкции позволяет нормировать влажностный режим, не рассчитывая всего распределения влажности по толщине конструкции, а находя максимальную влажность в конструкции и сравнивая ее с критической влажностью. Такой подход позволил выработать ограничения на характеристики конструкции для различных случаев. Наибольший интерес представляет ограничение на воздухопроницаемость конструкции. При этом введено понятие *критической воздухопроницаемости* конструкции, т.е. воздухопроницаемости при превышении которой влажностный режим конструкции становится неудовлетворительным. В безразмерных параметрах ограничение на воздухопроницаемость конструкции имеет вид:

$$\frac{e^{-\kappa r} - 1}{e^{-r} - 1} \leq D \quad (39)$$

$$\text{где: } D = \frac{F_u - F_n}{F_u - F_n} \quad \Gamma = -0,14 \cdot G_{sp} \cdot R_0^n \quad \kappa = \frac{R^n(\delta_u)}{R_0^n} \quad (40)$$

Анализ неравенства (39) показывает, что выражение, стоящее в левой части уравнения, изменяется в пределах от  $\kappa$  до 1. Соответственно, если  $D \geq 1$ , то влажностный режим конструкции не представляет проблем и может считаться, безусловно, благоприятным, если  $D \leq \kappa$ , то влажностный режим конструкции является неблагоприятным и нуждается в улучшении. В случае промежуточных значений  $D$ , влажностный режим конструкции зависит от величины воздухопроницаемости конструкции, если она больше критической воздухопроницаемости, то конструкция нуждается в улучшениях. Критическая воздухопроницаемость находится путем решения уравнения (39). Для облегчения поиска решения, корни уравнения (39) в зависимости от  $D$  и  $\kappa$  сведены в табл. 2.

Значения корней уравнения (39),  $\Gamma$ , при различных значениях параметров  $D$  и  $\kappa$ .

Значения $D$	Значения корней уравнения $\Gamma$ , при значениях $\kappa$								
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
0,1	1,71								
0,2	4,4	1,84							
0,3	7,13	3,43	1,14						
0,4	10,22	5,1	2,2	0,91					
0,5	13,86	6,9	3,28	1,8	0,82				
0,6	18,33	9,2	4,5	2,75	1,67	0,81			
0,7	24,1	12	6	3,85	2,62	1,69	0,87		
0,8	32,2	16,1	8	5,3	3,81	2,77	1,9	1,04	
0,9	46,1	23	11,5	7,66	5,7	4,4	3,4	2,5	1,51
0,95	59,9	30	15	10	7,5	5,9	4,74	3,75	2,75

На основе найденных решений уравнений влагопереноса, разработанной методики определения координаты плоскости максимального увлажнения материалов в ограждающей конструкции и введенного понятия критической воздухопроницаемости вместе с методикой ее определения, предложен инженерный метод оценки влажностного режима ограждающей конструкции, блок-схема которого представлена на рис.1.

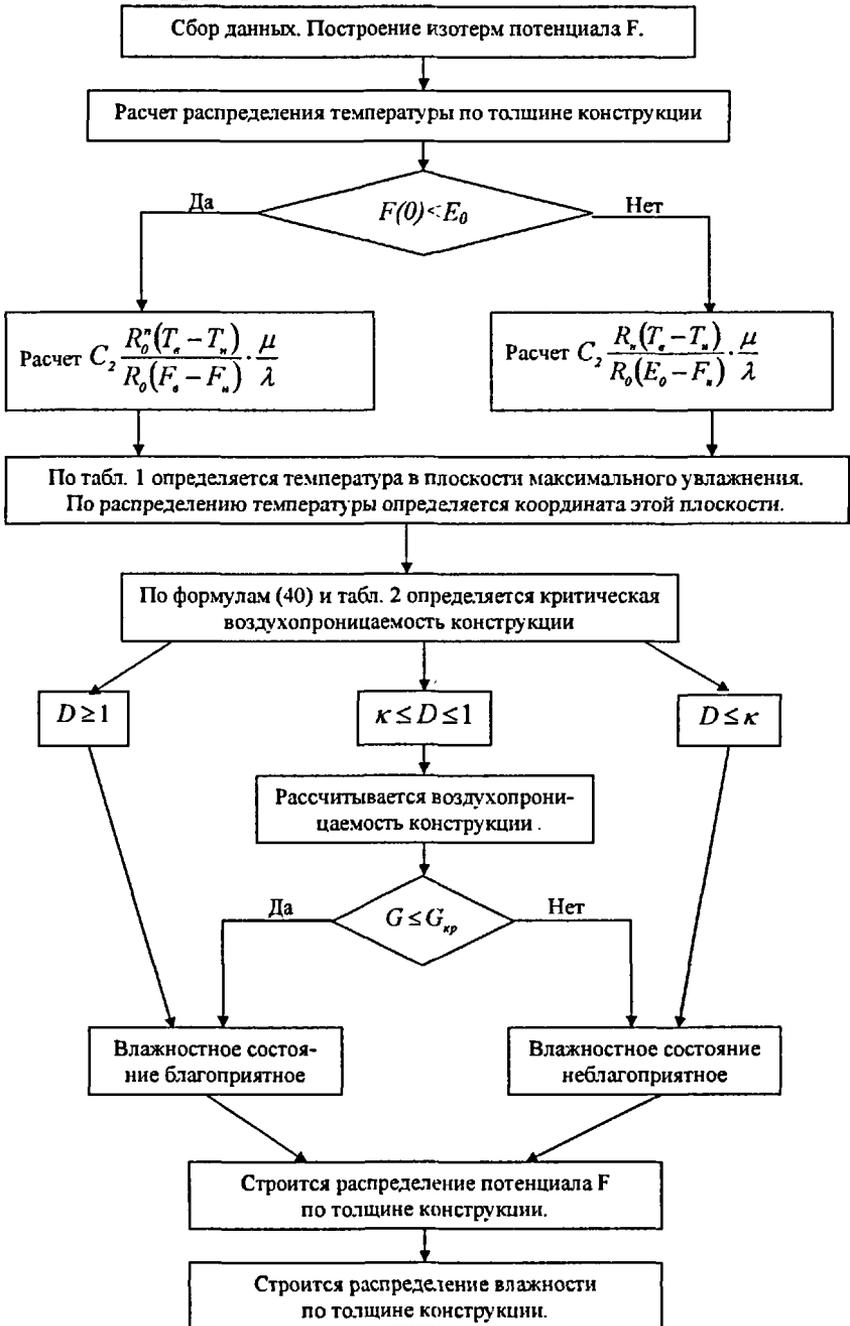
Четвертая глава диссертации посвящена экспериментальному определению теплофизических характеристик и построению зависимостей потенциала влажности  $F$  от влажности и температуры для ряда строительных материалов, наиболее часто используемых в современных ограждающих конструкциях. Кроме того, были выполнены достаточно полные исследования теплофизических свойств сравнительно новых материалов - модифицированных полистиролбетонов, которые проводились совместно с лабораторией бетонов и ограждающих конструкций НИИЖБ. Для определения параметров необходимых при проведении оценок влажностного состояния ограждающих конструкций разработанными методами использовались также литературные данные.

Экспериментально определялись изотермы сорбции водяного пара экспериментальным методом, теплопроводность, коэффициенты паропроницаемости, стационарной теплопроводности (в зависимости от влажности материала) и нестационарной теплопроводности, а также капиллярного всасывания воды материалов.

Пример экспериментально определенного коэффициента стационарной теплопроводности газобетона с характерным максимумом приведен на рис. 2.

Результаты экспериментов по определению стационарной теплопроводности и паропроницаемости материалов позволили определить максимальное эквивалентное дополнительное давление,  $H$  (табл. 3), необходимое для расчетов равновесных влажностей на стыке материалов (согласно формулы (12)). Полученные показатели позволили выполнить построения по методике главы 2 и составить банк данных по зависимостям потенциала  $F$  от влажности и температуры для строительных материалов. Пример такой зависимости приведен на рис.3.

Рис.1. Блок-схема алгоритма оценки влажностного режима ограждающих конструкций.



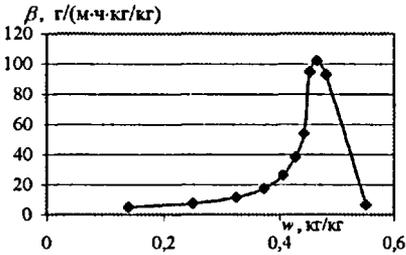


Рис. 2. Экспериментально определенный коэффициент стационарной влагопроводности газобетона плотностью 450 кг/м<sup>3</sup>.

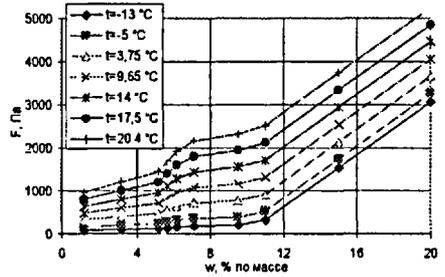


Рис. 3. Зависимость потенциала  $F$  от влажности полистиролбетона плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> при различных температурах.

Таблица 3.

Значения  $H$  для некоторых материалов.

Материал	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H, \text{Па}$	4075	52000	288	560	103	1810	3824	109524	36333

Столбцы: 1. - бетон, 2400 кг/м<sup>3</sup>; 2. - кирпич глиняный, 1800 кг/м<sup>3</sup>; 3. - минеральная вата, 100 кг/м<sup>3</sup>; 4. - мипора, 17 кг/м<sup>3</sup>; 5. - ПСБ-С, 25 кг/м<sup>3</sup>; 6. - модифицированный полистиролбетон на портландцементе, 230 кг/м<sup>3</sup>; 7. - модифицированный полистиролбетон на портландцементе, 420 кг/м<sup>3</sup>; 8. - полистиролбетон на магнезиальном вяжущем, 260 кг/м<sup>3</sup>; 9. - Газобетон, 450 кг/м<sup>3</sup>.



Рис. 4. Изотермы  $w(\psi)$ . (Зависимость влажности от относительного дополнительного давления). 1 – модифицированный полистиролбетон на портландцементе, 420 кг/м<sup>3</sup>; 2 – полистиролбетон на магнезиальном вяжущем, 260 кг/м<sup>3</sup>; 3 – газобетон, 450 кг/м<sup>3</sup>.

Проведенные экспериментальные исследования в совокупности с литературными данными позволили обеспечить оценки и расчеты влажностного состояния ограждающих конструкций разработанными методами.

В пятой главе выполнен анализ влажностного режима пяти конструкций наружных стен с повышенным уровнем теплозащиты. Кроме оценки влажностного состояния, конструкций, проведен расчет распределения влажности в стационарном состоянии разработанными в диссертации методами.

Для сравнения проведены расчеты нестационарного влажностного режима методом последовательного увлажнения по программе разработанной В.Г.Гагариным.

Для возможности сравнения влажностного состояния конструкций условия на их границах выбраны одинаковыми. Температура и относительная влажность наружного воздуха приняты равными соответствующим среднемесячным

значениям января в г. Москве:  $-10,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $87\%$  соответственно. Температура и относительная влажность внутреннего воздуха приняты соответствующими помещениям жилых зданий  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $55\%$ . В качестве критической принята максимальная сорбционная влажность материалов.

Первые две из рассмотренных конструкций являются однослойными. Обе конструкции представляют собой стену толщиной  $0,4\text{ м}$  оштукатуренную с наружной и внутренней стороны цементно-песчаным раствором толщиной  $0,02\text{ м}$ . В первом случае стена состоит из газобетонных блоков  $450\text{ кг/м}^3$ , во втором случае - из полистиролбетонных блоков  $400\text{ кг/м}^3$ . Стены снаружи окрашены.

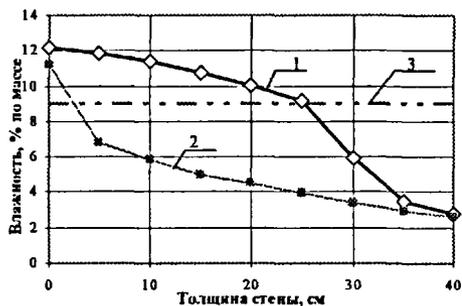
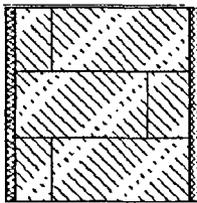


Рис. 5. Распределение влажности по толщине стены из газобетона. 1 — расчет по предложенному методу; 2 — расчет методом последовательного увлажнения при нестационарных условиях; 3 — максимальная сорбционная влажность.



при стационарных граничных условиях дал аналогичное распределение влажности, однако при нестационарных граничных условиях расчетное распределение влажности заметно отличается, только максимум влажности близок по величине и расположению. Результаты расчетов выявили значительную инерционность влажностного режима, анализ ее стационарного влажностного состояния целесообразно проводить для граничных условий усредненных за 5 - 6 наиболее холодных месяцев. Для улучшения влажностного режима конструкции требуется существенно снизить сопротивление паропрооницанию наружного отделочного слоя.

Альтернативой повышению проницаемости наружных отделочных слоев может стать снижение проницаемости конструкции в целом. Такой случай рассмотрен на примере второй конструкции - из полистиролбетонных блоков. Этот материал обладает паропрооницаемостью в 13 раз меньшей, чем ячеистый бетон. Анализ показал, что при исключении эксфильтрации воздуха влажностный режим конструкции находится на грани между удовлетворительным и неудовлетворительным. Плоскость максимального увлажнения находится на расстоянии  $9\text{ см}$  от наружной поверхности, максимальная влажность составляет  $10$

Анализ влажностного состояния первой из рассмотренных конструкций показал, что ее влажностный режим неудовлетворителен (т.е. влажность превышает принятую критическую) даже при отсутствии учета влияния эксфильтрации воздуха. Область максимального увлажнения в ней находится у наружной поверхности. Расчет распределения влажности по толщине конструкции разработанным стационарным методом показал, что большая часть ее находится при сверхсорбционной влажности материала, максимальная влажность составляет  $12,2\%$  по массе (рис.5). Расчет методом последовательного увлажнения

% по массе и лишь небольшая часть конструкции находится при сверхсорбционной влажности материала (рис.6). Расчет методом последовательного увлажнения (без учета эксфильтрации воздуха) при стационарных граничных условиях дает аналогичные результаты, а при нестационарных -отличающиеся: вся конструкция находится в зоне сорбционных влажностей материала, максимум влажности наблюдается у наружной поверхности ограждения и составляет 6,8% по массе. Сопротивление паропроницанию наружного отделочного слоя на фоне общего сопротивления паропроницанию конструкции не имеет такого значения, как в первой конструкции.

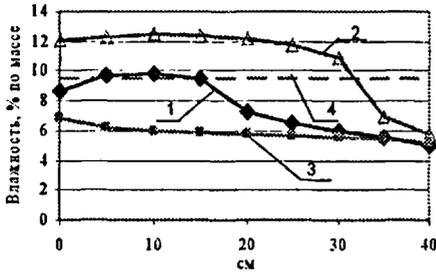
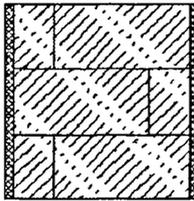


Рис. 6. Распределение влажности по толщине стены из полистиролбетонных блоков. 1 – расчет по предложенному методу; 2 – то же, с учетом эксфильтрации воздуха; 3 – расчет методом последовательного увлажнения при нестационарных условиях; 4 – максимальная сорбционная влажность.



Однако, даже небольшая эксфильтрация воздуха (при воздухопроницаемости конструкции равной  $0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ) приводит к значительному ухудшению ее влажностного режима, так, что большая часть конструкции находится при сверхсорбционной влажности материала, а максимальная влажность достигает 12,4% по массе. Следовательно, фильтрация воздуха через конструкцию должна быть исключена, что накладывает требования на штукатурку и кладочные швы.

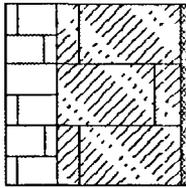
При повышении паропроницаемости наружной штукатурки соответственно ослабляются

требования и на воздухопроницаемость конструкции.

Третья конструкция представляет собой кладку из блоков полистиролбетона плотностью  $300 \text{ кг}/\text{м}^3$  толщиной 0,3 м и облицовочного глиняного кирпича толщиной 0,13. Анализ показал, что при исключении эксфильтрации воздуха влажностный режим конструкции находится на грани между удовлетворительным и неудовлетворительным. Плоскость максимального увлажнения находится на расстоянии 18,5 см от наружной поверхности, максимальная влажность полистиролбетона составляет 10 %, лишь небольшая часть конструкции находится при сверхсорбционной влажности материала (рис.7). Расчет методом последовательного увлажнения при стационарных граничных условиях дает несколько отличающееся распределение влажности, что вызвано различием методик расчета равновесной влажности на стыке материалов. При нестационарных граничных условиях метод последовательного увлажнения показывает, что вся конструкция находится в зоне сорбционных влажностей, максимум влажности наблюдается на стыке полистиролбетона и кирпичной кладки. Влажностный режим конструкции в отсутствие эксфильтрации воздуха удовлетворителен.



Рис 7 Распределение влажности по толщине стены из полистиролбетонных блоков и облицовочного кирпича. 1 – расчет по предложенному методу; 2 – расчет методом последовательного увлажнения при нестационарных условиях; 3 – то же, при стационарных условиях; 4 – максимальная сорбционная влажность



Расчет распределения влажности по толщине ограждающей конструкции разработанным стационарным методом показывает, что вся конструкция находится в зоне сорбционных влажностей материала, максимальная влажность наблюдается у наружной поверхности минеральной ваты и составляет 1,35% по массе (рис.8). Расчет методом последовательного увлажнения при нестационарных граничных условиях дает для января месяца практически то же распределение, максимальная влажность минеральной ваты составляет 1,39% по массе. Однако, даже небольшая эксфильтрация воздуха (при воздухопроницаемости конструкции  $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ) приводит к значительному ухудшению влажностного режима. Хотя в зоне со сверхсорбционными влажностями находится небольшая часть конструкции, влажность минеральной ваты в этой зоне превышает 100%. Результаты расчетов свидетельствуют, что данная конструкция обладает малой инерцией влажностного режима, который следует рассчитывать стационарным методом для среднемесячных граничных условий наиболее холодного месяца. При исключении эксфильтрации воздуха влажностный режим конструкции удовлетворителен. Фильтрация воздуха через конструкцию должна быть исключена, что накладывает требования на отделку внутренней поверхности.

Пятая конструкция представляет собой трехслойную железобетонную панель с утеплителем ПСБ-С. Состав конструкции, начиная с наружного слоя: железобетон толщиной 0,12 м, ПСБ-С 0,12 м, железобетон 0,08 м.

Анализ показал, что даже при отсутствии эксфильтрации воздуха через конструкцию, влажность ее материалов в расчетный период превышает макси-

Облицовка кирпичом более благоприятна для влажностного режима, чем оштукатуривание плотной штукатуркой с последующей покраской. Фильтрация воздуха через конструкцию должна быть ограничена, что накладывает требования на штукатурку для внутренней поверхности и растворные швы кладки.

Четвертая конструкция представляет собой кладку из глиняного кирпича толщиной 0,25 м, утепленную снаружи минеральной ватой толщиной 0,15 м (конструкция с навесным фасадом с воздушным зазором).

Анализ показал, что в отсутствие эксфильтрации воздуха влажностный режим данной конструкции удовлетворителен.

мальную сорбционную (принятую в качестве критической). Максимальное значение влажности достигается на стыке наружного слоя железобетона и ПСБ-С.

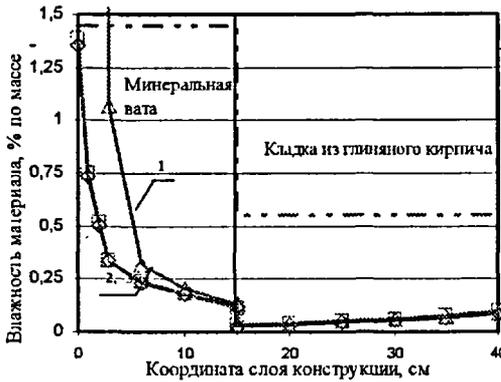


Рис.8 Распределение влажности по толщине стены с навесным фасадом с воздушным зазором. 1 – результаты расчета предложенным методом с учетом фильтрации воздуха; 2 – то же, но без учета фильтрации воздуха; 3 – результаты расчета методом последовательного увлажнения; 4 – максимальная сорбционная влажность.

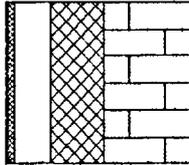
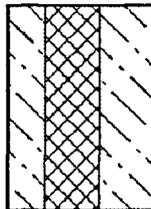


Рис.9. Распределение влажности по трехслойной стеновой панели. 1 – результаты расчета предложенным методом; 2 – результаты расчета методом последовательного увлажнения; 3 – максимальная сорбционная влажность.



Значительная часть конструкции находится при сверхсорбционной влажности материалов, максимальная влажность пенополистирола составляет 7,5% (рис.9). Расчет методом последовательного увлажнения при нестационарных граничных условиях дает похожее распределение, хотя максимальное значение влажности несколько ниже и составляет для ПСБ-С 4,5% по массе. Данная конструкция обладает значительной инерцией влажностного режима, и ее влажностное состояние стационарным методом следует рассчитывать для граничных условий усредненных за 3 – 4 наиболее холодных месяца. Для обеспечения влажности материалов конструкции не превышающих максимальную сорбционную необходимо применять пароизоляционные слои на стыке внутреннего слоя железобетона и ПСБ-С. Однако этот вывод может быть пересмотрен, если принять другое значение критической влажности материалов, превышающее максимальную сорбционную.

Приведенные расчеты влажностного состояния ограждающих конструкций иллюстрируют возможности разработанных методов. Они также позволяют наметить пути совершенствования ограждающих конструкций.

### Основные выводы.

1. Разработана математическая модель влагопереноса учитывающая паропроницаемость, теплопроводность и фильтрацию воздуха в ограждении. Модель позволяет также учитывать увлажнение конструкции жидкой влагой.
2. Предложен потенциал влажности, линеаризующий стационарное уравнение влагопереноса и использующий теплофизические характеристики материалов, по которым накоплен большой объем экспериментальных данных. Разработана методика построения зависимости этого потенциала от влажности и температуры материала.
3. Найден аналитический метод решения уравнения влагопереноса для одномерного стационарного случая, учитывающие паропроницаемость, теплопроводность и фильтрацию воздуха. Разработан графический метод построения распределения потенциала  $F$  и влажности по толщине ограждающей конструкции.
4. На основе теоретического рассмотрения процессов стационарной теплопроводности, выведено условие равновесия влажностей на стыке материалов, основанное на данных эксперимента стационарной теплопроводности.
5. Введено понятие плоскости максимального увлажнения в конструкции. Разработана методика аналитического определения координаты плоскости максимального увлажнения. Разработаны методы оценки ограждающих конструкций на достижение критической влажности, не требующие расчета их влажностного состояния.
6. Сформулирован инженерный метод оценки влажностного состояния ограждающих конструкций.
7. Экспериментально исследованы теплофизические характеристики ряда строительных материалов. По экспериментально полученным и литературным данным проведены расчеты характеристик строительных материалов, наиболее часто используемых в современных ограждающих конструкциях. В частности построены линии равной влажности и изотермы потенциала  $F$  строительных материалов.
8. Рассчитано влажностное состояние ряда современных ограждающих конструкций. Дан анализ их влажностного состояния и рекомендации по его улучшению при необходимости.
9. Результаты диссертации использованы в Рекомендациях, разработанных Госстроем России, Альбоме технических решений ООО «ДИАТ-2000» и при проектировании ряда строительных объектов г. Москвы.

### Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях.

1. Козлов В.В. Сопоставление математических моделей влагопереноса в ограждающих конструкциях. // Сборник докладов шестой научно - практической конференции 26-28 апреля 2001 года. «Проблемы строительной теплофизики, систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях». (Академические чтения, посвященные памяти В.Н. Богословского) М., НИИСФ, 2001, стр. 295 - 300.
2. Волинский Б.Н., Козлов В.В. Конструктивные решения стен современных энергосберегающих зданий, //там же, стр. 189 - 191.
3. Кохюв В.В. Анализ влагонакопления в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации. // Сборник докладов седьмой научно - практической конференции 18-20

апреля 2002 года. «Актуальные проблемы строительной теплофизики». (Академические чтения). М., НИИСФ, 2002, стр. 247 - 254.

4. Козлов В.В. Параметры зоны конденсации ограждающей конструкции, с учетом теплопроводности материалов. // там же, стр. 255 - 260.
5. Гагарин В.Т., Козлов В.В., Ченцов М.А. Прогрессивные материалы и технологии, конкурентоспособные отечественные изделия, производство прогрессивных окон. (Теплотехнические аспекты). // В сб. материалов научно-практической конференции «Проблемы развития архитектуры и градостроительства в городе Уфе», Уфа, Министерство строительства, архитектуры и дорожного комплекса republ. Башкортостан, 2002, стр. 47-49.
6. Гагарин В.Т., Козлов В.В. Основы для разработки инженерного метода расчета влажностного режима // Сборник докладов восьмой научно - практической конференции 24-26 апреля 2003 года. «Стены и фасады. Актуальные проблемы строительной теплофизики». (Академические чтения). М., НИИСФ, 2003, стр. 23 - 35.
7. Козлов В.В. Учет фильтрации влажного воздуха при расчете влажностного режима ограждающей конструкции. // там же, стр. 54 - 60.
8. Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Особенности теплозащитных свойств вентилируемых фасадов. // там же, стр. 116 - 124.
9. Гагарин В.Т., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором. // Журнал АВОК. 2004, №2 стр. 20-26, №3 стр. 20-26.
10. Фасадные теплоизоляционные системы с воздушным зазором. Рекомендации по составу и содержанию документов и материалов, представляемых для технической оценки пригодности продукции. М., Госстрой России, 2004. С.58.

Условные обозначения.

$a_{12}$  – коэффициент численно равный  $H_1/H_2$ ;

$C_2$  – численный коэффициент равный 5330;

$c_n$  – концентрация водяного пара  $кг/м^3$ ;

$E$  – давление насыщенного водяного пара, Па;

$E_0$  –\* давление насыщенного водяного пара на наружной границе ограждающей конструкции, Па;

$E_{i+1}$  – давление насыщенного водяного пара на стыке между  $i$ -ым и  $i+1$ -ым слоем, Па;

$e$  – парциальное давление водяного пара в порах материала, Па;

$e_{e,n}$  – парциальные давления водяного пара внутреннего и наружного воздуха, Па;

$F_m$  – потенциал  $F$  соответствующий критическому увлажнению материала, Па;

$G$  – воздухопроницаемость конструкции,  $кг/(м^2 \cdot ч)$ ;

$H$  – характеристика материала, используемая при расчете равновесной влажности на стыке материалов, Па;

$j_\phi$  – поток пара  $кг/(м^2 \cdot ч)$ ;

$p$  – давление воздуха в порах материала, составляющего конструкцию, Па;

$q_{e,n}$  – поток жидкой влаги приходящий через поверхность ограждения,  $г/(м^2 \cdot ч)$ ;

$R^e$  – сопротивление воздухопроницанию конструкции,  $м^2 \cdot ч \cdot Па/кг$ ;

$R_{e,n}$  – сопротивление влагообмену у поверхности ограждения,  $м^2 \cdot ч \cdot Па/мг$ ;

$R_\sigma^n$  – общее сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции,  $м^2 \cdot ч \cdot Па/мг$ ;

$R_i$  – сопротивление паропроницанию  $i$ -ого слоя ограждающей конструкции,  $м^2 \cdot ч \cdot Па/мг$ ;

$R_G$  – сопротивление теплопередаче ограждения,  $(м^2 \cdot °C)/Вт$ ;

$R^m$  – термическое сопротивление слоя конструкции от 0 до  $x$ ;

$S_{e,n}$  – поверхность ограждения, внутренняя и наружная соответственно;

$T$  – температура, К;

$T_{e,n}$  – температура внутреннего и наружного воздуха соответственно, К;

$t_{e,n}$  – температура внутреннего и наружного воздуха соответственно, °C;

$\bar{v}$  – скорость движения воздуха  $м/с$ ;

$w$  – влажность материала, % по массе или  $кг/кг$ ;

- $x$  – высота над уровнем воды рассматриваемой точки, м;
- $x_0$  – высота над уровнем воды точки в которой влажность образца равна максимальной сорбционной, (в эксперименте стационарной влагопроводности), м;
- $\beta$  – коэффициент влагопроводности материала,  $\text{г}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{кг}/\text{кг})$ ;
- $\gamma_0$  – плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
- $G$  – безразмерный параметр, характерна ющий критическую воздухопроницаемость конструкции;
- $\delta$  – общая толщина ограждающей конструкции, м;
- $\delta_{i+1}$  – координата стыка между  $i$ -ым и  $i+1$ -ым слоем, м;
- $\delta_{ic}$  – координата перехода материала ограждения от сверхсорбционной к сорбционной влажности, м;
- $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ;
- $\mu$  – коэффициент паропроницаемости материала,  $\text{мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$ ;
- $\tau$  – время, ч;
- $\varphi$  – относительная влажность воздуха, доли единицы.

### «АВТОРЕФЕРАТ»

#### Козлов Владимир Владимирович

Лицензия ИД №03630 от 25.12.2000г. ООО "Эрфольг-А"

127030, г. Москва, Новослободская ул. д. 18

Бумага офсетная. Печать ризография.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 0.75 Тираж 100 экз.

заказ №1138

Отпечатано в ООО "Эрфольг-А"

Москва, ул. Новослободская 18. тел.: (095) 972-30-55