journal homepage: www.alfabuild.spbstu.ru

doi: 10.34910/ALF.13.1

Совершенствование методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций

Improving methods of temperature and humidity calculation in enclosing structures

С.В. Корниенко ^{1*}¹Волгоградский государственный технический университетS.V. Korniyenko ^{1*}¹Volgograd State Technical University

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

температурно-влажностный режим,
ограждающая конструкция,
влагоперенос,
защита от влаги,
конденсация влаги,
потенциал влажности,
методы расчета

KEYWORDS

temperature-humidity regime,
enclosing structure,
moisture transfer,
protection from moisture,
moisture condensation,
moisture potential,
calculation methods

АННОТАЦИЯ

В связи с широким внедрением в практику современного строительства ограждающих конструкций с повышенными теплозащитными свойствами возрастает необходимость оценки их влажностного режима. Теоретические основы и методы расчета температурно-влажностного режима наружных ограждений отражены в многочисленных отечественных и зарубежных публикациях. Однако систематизация данных по математическим моделям влагопереноса в настоящее время отсутствует, что делает актуальной задачу определения вектора развития теории и методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций. Целью изучения является аналитический обзор современной направленности работ в области методологии температурно-влажностного режима наружных ограждений в России и за рубежом. Используются общенаучные методы исторической ретроспективы и сопоставительного анализа. Изучены архивные научные источники и документы за период с 1925 по 2019 г.г. Выполнен поиск и отбор релевантной литературы с применением эффективных критериев подбора источников. Проведен тематический анализ методов расчета с точки зрения физических процессов движения влаги, потенциалов и уравнений переноса. Выполнена систематизация математических моделей влагопереноса. Показаны преимущества математических моделей влагопереноса, основанных на теории потенциала влажности. Применение теории потенциала влажности позволяет существенно упростить математическую модель влагопереноса и расширить область применения модели на сверхсорбционную зону влажности материалов ограждающих конструкций. Установлено, что методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций получили широкое применение в мировой практике при решении конкретных прикладных задач строительной теплофизики, однако единой теории влагопереноса пока не создано. Исследования доказали, что разработка теории и методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций актуальна и перспективна.

ABSTRACT

Widespread implementation of enclosing structures with high thermal properties into modern construction entails the need to assess their humidity regime. Theoretical bases and methods of temperature-humidity calculation in enclosing structures are reflected in numerous domestic and foreign publications. However, data systematization on mathematical models of moisture transfer is currently not available, which makes it urgent to determine development vector of the theory and methods of moisture transfer calculation in enclosing structures. The purpose of the study is analytical review of the current focus of work in the field of methodology of temperature-humidity conditions in enclosing structures in Russia and abroad. General scientific methods of historical retrospective and comparative analysis were being used. Archival scientific sources and documents from 1925 to 2019 have been studied. The search and selection of relevant literature on the bases of effective criteria for selection of sources was carried out. The thematic analysis of calculation methods in terms of physical processes of moisture movement, potentials and transport equations was undertaken. The advantages of moisture transfer

mathematical models based on the theory of moisture potential are shown. Application of the theory of moisture potential can greatly simplify the mathematical model of moisture transfer and expand the scope of application of the model on excess sorption humidity area of materials' moisture in enclosing structures. It is established that methods of calculating temperature-humidity regime in enclosing structures are widely used in international practice for solving specific applied tasks of construction thermal physics, but a comprehensive theory of moisture transfer in enclosing structures has not yet been developed. The study has proved that the development of the theory and methods of temperature-humidity calculation in enclosing structures is relevant and promising.

Введение

Защита от влаги - актуальная проблема строительства. Переувлажнение строительных ограждающих конструкций приводит к ухудшению их эксплуатационных свойств. Прежде всего, снижаются теплозащитные свойства, что объясняется ростом теплопроводности строительных материалов с увеличением влажности. Снижение теплозащитных свойств ограждающих конструкций способствует повышению трансмиссионных тепловых потерь и энергозатрат на эксплуатацию здания в отопительный период. Накопление влаги на внутренней поверхности теплозащитной оболочки здания приводит к ухудшению микроклимата в помещениях, непосредственно влияющего на здоровье человека. Рост плесневых грибов вследствие повышенной влажности является источником аллергических заболеваний. Кроме того, влажные строительные материалы в составе ограждающей конструкции быстро разрушаются от коррозии, недостаточной морозостойкости и влагостойкости, биологических процессов, тем самым снижая долговечность конструкций и срок эксплуатации всего здания. Поэтому при проектировании зданий необходимо предусматривать мероприятия и разрабатывать конструктивные решения, предотвращающие чрезмерное увеличение влажности [1-5].

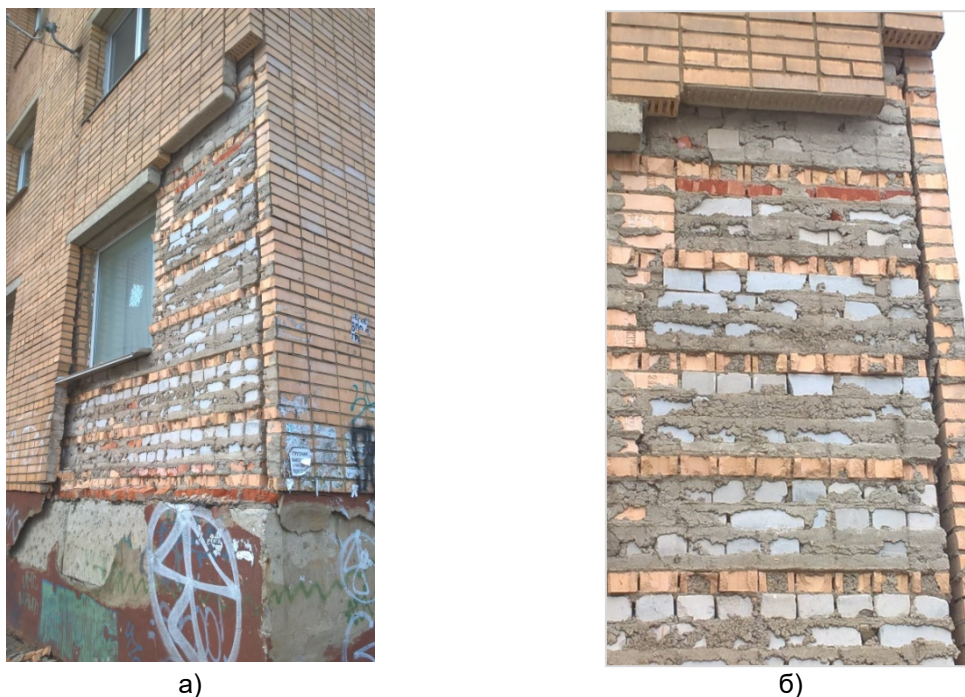


Рисунок 1 - Обрушение фрагмента лицевой кирпичной кладки наружных стен жилого здания в Смоленске: а - общий вид; б - фрагмент фасада

Различают следующие виды влаги в ограждающих конструкциях: строительную, грунтовую, метеорологическую (атмосферную), эксплуатационную, гигроскопическую (сорбционную) и конденсационную. Наибольшую опасность для ограждающих конструкций в процессе их эксплуатации представляет конденсационное увлажнение. Оно возникает при термической конденсации водяного пара на внутренней поверхности или в толще конструкции. Переувлажненные ограждающие конструкции создают угрозу безопасности зданий и сооружений (рис. 1). Преждевременное разрушение зданий наносит существенный материальный ущерб государству.

Выбор рационального конструктивного решения на стадии проектирования тесно связан с проблемой исследования процессов теплообмена, прогноза температурно-влажностного режима ограждающих конструкций и повышения точности теплотехнических расчетов. В ограждающих конструкциях влагообмен происходит под влиянием разности влагосодержаний, давлений, температур и сил, вызванных разными энергиями связи в соприкасающихся материалах. В отличие от переноса теплоты,

где движущей силой (потенциалом) является температура, относительно выбора потенциала влажности нет единого мнения [2]. По меткому выражению академика РААСН В.Н. Богословского, «Влага в ограждающих конструкциях - это таинственная незнакомка». Выбор потенциала влажности имеет большое значение с точки зрения общей применимости и точности математических моделей и компьютерных программ, разработанных на их основе. Так как в материалах наружных ограждений влага может перемещаться в виде водяного пара или жидкости под действием различных движущих сил, в модели влагопереноса может быть принято несколько потенциалов влажности.

Множество подходов к выбору потенциала влажности, многообразие математических моделей влагопереноса и методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций, недостаточный объем экспериментальных данных, частое несоответствие результатов теоретических и экспериментальных исследований не обеспечивают преемственность развития науки и научного творчества и затрудняют создание единой теории влагопереноса.

В связи с широким внедрением в практику современного строительства ограждающих конструкций с повышенными теплозащитными свойствами необходимость оценки их влажностного режима возрастает. Основные принципы создания и совершенствования методов расчета влажностного режима элементов оболочки здания отражены в многочисленных отечественных и зарубежных публикациях. Однако в настоящее время отсутствует анализ направленности работ и систематизация данных по математическим моделям влагопереноса. Это делает актуальной задачу определения вектора развития отечественных и зарубежных методов расчета влагопереноса в ограждающих конструкциях.

Целью исследования является аналитический обзор современной направленности работ в области методологии влажностного режима ограждающих конструкций в России и в зарубежных странах.

Методы

Для исследования использованы общенаучные методы исторической ретроспективы и сопоставительного анализа. Изучены архивные научные источники и документы за период с 1925 по 2019 г.г. Выполнен поиск и отбор релевантной литературы с применением эффективных критериев подбора источников. Проведен тематический анализ методов расчета с точки зрения физических процессов движения влаги, потенциалов и уравнений переноса. Выполнена систематизация математических моделей влагопереноса.

Результаты и обсуждение

Результаты аналитического обзора методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций представлены ниже.

1. Упрощенные методы расчета

Упрощенными считают методы расчета, которые могут быть использованы при проектировании ограждающих конструкций без применения специальных компьютерных программ. Необходимость в таких методах сохраняется, поскольку они отражают физику процесса и их целесообразно включать в нормативные документы. Область применения упрощенных методов расчета ограничена, как правило, многослойными ограждающими конструкциями при стационарных условиях влагопереноса.

Впервые необходимость учета влажностного режима как самостоятельного фактора отмечена в работе В.Д. Мачинского в конце 20-х годов прошлого века [6]. В ней указывается на перемещение водяного пара в конструкции за счет разности парциальных давлений пара по обе стороны ограждения. Водяной пар перемещается от теплой стороны ограждения к холодной и конденсируется на холодных поверхностях, что приводит к снижению теплозащитных и санитарно-гигиенических свойств конструкций. Однако В.Д. Мачинский не предлагает конкретной методики расчета, а лишь рекомендует некоторые строительные приемы, улучшающие влажностный режим: устройство слоев пароизоляции с теплой стороны ограждения, правильное, с точки зрения влажностного режима, расположение слоев в многослойных конструкциях и т.п. Более подробно механизм увлажнения ограждающих конструкций описан А.Н. Борщевским [7].

Впервые метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций был разработан К.Ф. Фокиным в 1932 г. [8]. Данный метод основан на модели диффузии водяного пара за счет разности парциального давления пара по обе стороны ограждения. Метод позволяет определить зону возможной конденсации влаги и количество конденсата в ограждении, определяемое по разности количеств водяного пара, притекающего к зоне конденсации и уходящего от нее. Производя расчет влажностного режима для годового периода, можно рассчитать годовой баланс влаги и таким образом установить, будет ли ограждение с течением времени увлажняться или высыхать. Из-за простоты и ясности физической модели и малой трудоемкости различные модификации этого метода широко применяются в настоящее время как в отечественной, так и зарубежной практике.

Среди модификаций метода К.Ф. Фокина можно отметить работу Э.Х. Одельского [9], который усовершенствовал его учетом фильтрации влажного воздуха и применил к расчету деревянных покрытий. А.М. Шкловер предложил при определении зоны конденсации учитывать инерционность ограждения к температурно-влажностным воздействиям среды [10], разработав методику определения расчетной температуры наружного воздуха. Метод фокусов [11], предложенный Ф.В. Ушковым, позволяет весьма просто определить зону возможной конденсации водяного пара в многослойном ограждении. В.М. Ильинский разработал метод расчета ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения и определения требуемого сопротивления паропроницанию ограждений [12]. М.В. Поликанов предложил метод теплотехнического расчета ограждающих конструкций по предельным градиентам [13], который позволяет подобрать два слоя ограждения (теплозащитный и пароизоляционный) при условии отсутствия конденсации влаги. В настоящее время этот метод усовершенствован А.Г. Перехоженцевым и использован для нормирования влажностного режима ограждающих конструкций зданий [14]. Д.А. Андреев, В.А. Могутов и А.Н. Цирлин предложили методику выбора расположения слоев ограждающей конструкции, критерием которого является недопущение внутренней конденсации [15]. Ю.С. Вытчиков и И.Г. Беляков разработали метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций на основе безразмерных характеристик [16], который позволяет определить плоскость конденсации для многослойных ограждений. Развитием этого метода является метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения на основе определения плоскости максимального увлажнения [17, 18], разработанный В.В. Козловым и включенный в актуализированную редакцию СП 50.13330.2012.

Метод расчета, аналогичный предложенному К.Ф. Фокиным, был разработан в ФРГ в конце 50-х годов прошлого века Н. Glaser'ом [19]. Метод Н. Glaser'a послужил основой для разработки Международного стандарта ISO 13788 «Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods», а различные модификации этого метода получили широкое применение в зарубежной практике [20-35].

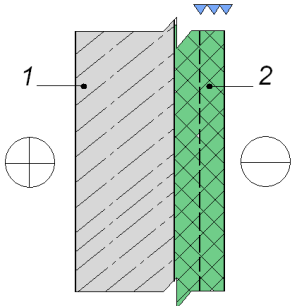
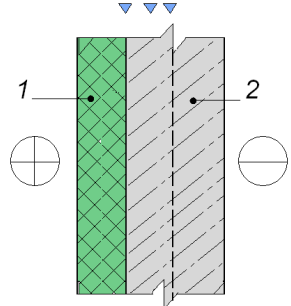
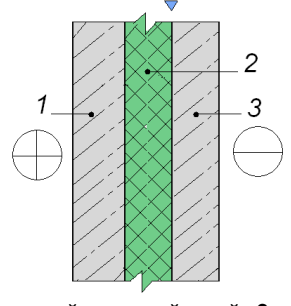
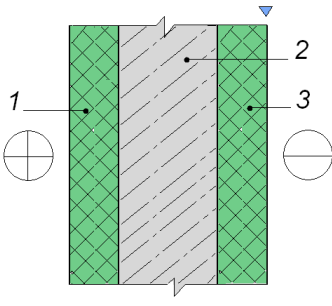
В России современные требования и метод расчета защиты от переувлажнения ограждающих конструкций отражены в разделе 8 СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий». Этот метод распространяется на одномерные элементы ограждающих конструкций, увлажняемые напором водяного пара из помещений в отапливаемый период по механизму паропроницаемости. Перенос жидкой фазы влаги не учитывают. Оценку влагозащитных свойств конструкции производят по предельно допустимому состоянию увлажнения на основе определения плоскости максимального увлажнения, относительно которой, используя уравнения баланса влаги, выполняют проверку необходимости устройства дополнительной пароизоляции в конструкции.

Сложность алгоритма расчета плоскости максимального увлажнения сдерживает широкое применение метода СП 50.13330.2012 на практике. В СП 345.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты» предложен упрощенный метод нахождения плоскости максимального увлажнения. Авторским коллективом этого свода правил разработана классификация ограждающих конструкций по взаимному расположению слоев. Все слои конструкции подразделяют на два типа - проницаемые и плотные. В зависимости от отношения паропроницаемости материала (μ) к его теплопроводности (λ) установлена граница между проницаемыми и плотными слоями: $\mu/\lambda \geq 1$ - проницаемый слой; $\mu/\lambda < 1$ - плотный слой. По классу ограждающей конструкции определяют место расположения плоскости максимального увлажнения (табл. 1).

Таблица 1 - Определение места расположения плоскости максимального увлажнения в конструкции согласно СП 345.1325800.2017

Класс конструкции	Схема конструкции	Расположение плоскости максимального увлажнения в конструкции
Однослойная		В наружной половине слоя

Продолжение таблицы 1

Класс конструкции	Схема конструкции	Расположение плоскости максимального увлажнения в конструкции
<p>Двухслойная, с плотным слоем со стороны помещения (наружное утепление)</p>	 <p>1 - внутренний плотный слой; 2 - наружный проницаемый слой</p>	<p>В наружной половине проницаемого слоя</p>
<p>Двухслойная, с проницаемым слоем со стороны помещения (внутреннее утепление)</p>	 <p>1 - внутренний проницаемый слой; 2 - наружный плотный слой</p>	<p>На стыке проницаемого и плотного слоев или во внутренней половине плотного слоя</p>
<p>Трехслойная, с проницаемым слоем в середине</p>	 <p>1 - внутренний плотный слой; 2 - средний проницаемый слой; 3 - наружный плотный слой</p>	<p>На стыке проницаемого и наружного плотного слоев ¹⁾</p>
<p>Трехслойная, с плотным слоем в середине</p>	 <p>1 - внутренний проницаемый слой; 2 - средний плотный слой; 3 - наружный проницаемый слой</p>	<p>На наружной границе наружного проницаемого слоя ²⁾</p>

¹⁾ для внутреннего плотного слоя из легких бетонов или поризованной керамики возможно смещение плоскости максимального увлажнения в глубину проницаемого слоя;

²⁾ для данной конструкции возможно возникновение второй плоскости максимального увлажнения, но ее следует игнорировать.

Координату плоскости максимального увлажнения определяют по температуре в этой плоскости в зависимости от климатического и конструкционного факторов согласно п. 8.3.3 СП 345.1325800.2017. Классификация ограждающих конструкций позволяет упорядочить работу проектировщика и нацеливает его на определение плоскости максимального увлажнения в конкретной области наружного ограждения. Разделение факторов на климатический, зависящий от параметров микроклимата помещения и наружного климата, и конструкционный, зависящий от теплофизических свойств материалов и теплотехнических свойств ограждающей конструкции, повышает качество проектирования зданий. Однако недостаточная ясность алгоритма нахождения плоскости максимального увлажнения в конструкции сдерживает широкое применение этого метода на практике.

Нормирование влагозащитных свойств ограждающих конструкций согласно СП 50.13330.2012 имеет ряд недостатков [36-42]. Метод расчета по защите от переувлажнения ограждающих конструкций содержит ряд неопределенностей [36]. Недостаточно обоснована величина предельно допустимого увлажнения материалов конструкции. Плоскость максимального увлажнения определяют для периода влагонакопления (периода с отрицательными среднемесячными значениями температуры наружного воздуха), а результаты расчета распространяют на годовой период. Статья [37] содержит критический анализ СП 50.13330.2012 и предложения по корректировке норм. В своде правил отсутствует возможность оценки влагонакопления в ограждающих конструкциях по месяцам в годовом цикле [38]. Отсутствует определение базового термина «плоскость максимального увлажнения», что затрудняет понимание алгоритма расчета и интерпретацию результатов. Алгоритм определения плоскости максимального увлажнения для ряда современных ограждающих конструкций дает физически необоснованный результат и нуждается в корректировке [39]. Данный алгоритм расчета неприменим к ограждающим конструкциям с мультizonальной конденсацией влаги [40]. При определении требуемых значений сопротивления паропрооницанию конструкций не учитывают изменение параметров микроклимата помещений в течение года [41]. При определении сопротивлений теплообмену у внутренней поверхности конструкции не учитывают направление теплового потока. В расчетах влажностного режима не учитывают сопротивления влагообмену у внутренней и наружной поверхностей ограждающей конструкции. Отсутствуют значения предельно допустимого приращения влажности для ряда эффективных теплоизоляционных материалов, широко применяемых в современной практике строительства. Указанные выше обстоятельства могут внести существенную погрешность в результаты расчетов.

Выявленные недостатки нормирования влагозащитных свойств ограждающих конструкций согласно СП 50.13330 указывают на актуальность задачи совершенствования российских норм по влагозащите конструкций.

В целях совершенствования российской нормативной базы и повышения качества проектирования зданий разработаны предложения по корректировке раздела «Защита от переувлажнения ограждающих конструкций» СП 50.13330.2012 [42]. Указанные предложения содержат принципиальные основы оценки влагозащитных свойств ограждающих конструкций по предельно допустимому состоянию увлажнения и гармонизированы с Международным стандартом ISO 13788. В отличие от метода оценки влагозащитных свойств ограждающих конструкций, принятого в российских нормах, предлагаемый метод [42] позволяет выполнить анализ динамики влагонакопления в конструкции в годовом цикле. По сравнению с Международным стандартом ISO 13788 этот метод дает более точную оценку влажностного режима современных многослойных ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты.

Особый интерес представляют упрощенные методы расчета влагопереноса в ограждающих конструкциях на основе потенциала влажности. Использование потенциала влажности позволяет рассчитать влажностный режим многослойных ограждающих конструкций при сверхсорбционной влажности в широком диапазоне изменения температуры. Это имеет большое практическое значение во многих задачах строительной теплофизики, в частности, при расчете продолжительности сушки влажных строительных материалов в начальный период эксплуатации ограждающих конструкций.

В.Н. Богословский предложил метод расчета влагопередачи через ограждение на основе экспериментального потенциала влажности [43, 44]. Данный метод основан на стационарной модели влагопередачи за счет разности потенциалов влажности по обе стороны ограждения. Метод позволяет строить профиль влагосодержания по толщине ограждения по известному распределению температуры и потенциала влажности. В.Г. Гагарин и В.В. Козлов разработали метод расчета [18] на основе функции, названной ими потенциалом F , учитывающей совместный перенос пара и жидкой влаги. Введение этого потенциала позволило существенно упростить уравнение влагопереноса и решить его аналитически. Потенциал F рассчитывается по характеристикам, традиционно используемым для строительных материалов и содержащимся в справочной литературе: коэффициентам паропрооницаемости, влагопроводности и изотермам сорбции (десорбции). Результатом расчета является профиль влагосодержания по толщине ограждающей конструкции, который строится по известной зависимости $F(w, t)$. Полученные расчетом результаты могут служить для проверки влагонакопления в ограждающей конструкции. В настоящее время этот метод модифицирован В.В. Козловым для учета фильтрации влажного воздуха через ограждение. С.В. Корниенко разработал упрощенный метод определения

плоскости наибольшего увлажнения [45] для многослойных ограждающих конструкций. Указанный метод позволяет определить наиболее опасное в отношении влажностного режима сечение конструкции без построения профилей влагосодержания. Метод научно обоснован, детально разработан и доведен до практической реализации в компьютерной программе «Наибольшее увлажнение конструкций (НУК)» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619917 от 25.09.2014). В отличие от существующих методов расчета разработанный метод позволяет выполнить оценку защиты ограждающих конструкций от переувлажнения в широком диапазоне влажности, дает количественную характеристику степени переувлажнения материалов и применим к расчету ограждений с мультizonальной конденсацией влаги [40].

Все рассмотренные выше методы основаны на стационарных условиях влагопереноса. Методы стационарного массообмена удобны для экспресс-оценки влажностного режима наружных ограждений, просты и наглядны и поэтому часто используются на практике. Однако они являются приближенными, так как не учитывают течение процесса во времени. Малая интенсивность влагопереноса в строительных материалах, переменность температурно-влажностных воздействий воздушной среды и существенная нелинейность характеристик влагопереноса не позволяют установиться стационарному влажностному режиму в ограждающей конструкции. Поэтому более точными являются методы расчета, основанные на моделях нестационарного влагопереноса.

2. Уточненные методы расчета

Как показано выше, методы расчета, которые рассматривают только перенос водяного пара в ограждающих конструкциях, не потеряли своего практического значения. В практике строительного проектирования и в нормативных методах в настоящее время широко используется теория диффузии пара в сорбирующей среде. Эта теория рассматривает процессы влагопереноса только при сорбционной влажности строительных материалов. За потенциал влажности в этой теории принимают парциальное давление водяного пара во влажном воздухе, заполняющем поры материала, предполагая, что сорбированная материалом влага прочно связана с ним и в жидком состоянии неподвижна. Перемещение влаги происходит посредством диффузии под влиянием градиента парциального давления водяного пара. Дифференциальное уравнение диффузии пара в сорбирующей среде для одномерной задачи имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где ω - концентрация влаги в материале, кг/м³; τ - время, с; x - пространственная координата, м; μ - паропроницаемость материала, кг/(м·с·Па); p - парциальное давление водяного пара, Па.

В формуле (1) концентрация влаги ω , кг/м³, связана с влагосодержанием w , кг/кг, следующей формулой:

$$\omega = \rho_0 w,$$

где ρ_0 - плотность материала в сухом состоянии, кг/м³.

Влагосодержание материала связано с парциальным давлением водяного пара зависимостью $w(p, t)$, определяемой по изотермам сорбции или десорбции. Поскольку парциальное давление водяного пара зависит от влагосодержания материала и его температуры, то величина p является неизотермическим потенциалом переноса водяного пара. В изотермических условиях ($t = \text{const}$) парциальное давление водяного пара пропорционально относительной влажности воздуха φ .

Метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций, основанный на уравнении (1), был рассмотрен А.С. Эпштейном [46]. Решение этого уравнения производилось методом конечных разностей по явной схеме аппроксимации, при этом устойчивость достигалась с помощью итераций в пределах каждого временного шага. Метод А.С. Эпштейна ввиду сложности расчета находит ограниченное практическое применение.

Распространяя аналогию между теплопроводностью и диффузией на нестационарные условия, К.Ф. Фокин разработал метод последовательного увлажнения материалов в наружных ограждениях [47] на основе уравнения:

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = \frac{\mu p_s}{\rho_0 \xi_0} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где p_s - давление насыщенного водяного пара, Па; ξ_0 - удельная относительная пароемкость материала, кг/кг, полученная дифференцированием функции $w(\varphi)$, определяемой по изотерме сорбции ($\xi_0 = dw/d\varphi$).

Решая уравнение (2), определяют значения парциального давления пара в различных сечениях конструкции на некоторые моменты времени и, пользуясь изотермами сорбции (десорбции), переводят их в соответствующие равновесные влагосодержания.

Заметим, что уравнение (2) может быть получено из уравнения (1) путем следующих преобразований:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \frac{\partial(\rho_0 w)}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \rho_0 \xi_0 \cdot \frac{\partial \left(\frac{p}{p_s} \right)}{\partial \tau} = \frac{\rho_0 \xi_0}{p_s} \cdot \frac{\partial p}{\partial \tau}.$$

Решение уравнения (2) получено К.Ф. Фокиным методом конечных разностей по явной схеме. Для устойчивости принятой расчетной схемы накладывалось ограничение на шаги по координате. Для удобства расчета разбивка ограждения на расчетные слои проводилась графическим способом, предложенным О.Е. Власовым [48], при этом толщина расчетных слоев принималась пропорциональной $\sqrt{p_s}$. Изотермы сорбции водяного пара в материале ограждения принимались в виде прямых, удельная относительная пароемкость материала постоянна ($\xi_0 = \text{const}$).

В дальнейшем К.Ф. Фокин значительно усовершенствовал этот метод [49]. В окончательном варианте метода последовательного увлажнения [1] для устойчивости принятой конечно-разностной схемы на временной шаг накладывалось ограничение при произвольной разбивке ограждения на расчетные слои, а удельная относительная пароемкость зависит от влажности материала. Температурный режим ограждения принят стационарным в течение каждого месяца (сезона) года.

Поскольку в рассмотренных моделях не учитывается перенос жидкой влаги, они имеют ограниченное применение.

Одними из первых исследовали перенос жидкой фазы влаги в пористых материалах О.Е. Власов [50] и Р.Е. Брилинг [51]. Основываясь на этих исследованиях, К.Ф. Фокин [1] предложил дополнить метод последовательного увлажнения учетом перемещения жидкой фазы влаги. На основе экспериментальных исследований он показал, что имеется два основных механизма переноса влаги в материалах: диффузия водяного пара под действием градиента парциального давления пара и капиллярная диффузия жидкости под действием градиента влагосодержания. При расчете совместного перемещения парообразной и жидкой фаз влаги дифференциальное уравнение влагопереноса имеет вид:

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial p}{\partial x} + \beta \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad (3)$$

где w - влагосодержание, кг/кг; μ - паропроницаемость материала, кг/(м·с·Па); β - влагопроводность материала, кг/[м·с·(кг/кг)].

Первый член в правой части (3) учитывает перемещение пара в сорбционной зоне, при этом предполагается, что адсорбированная жидкость связана со стенками пор и не перемещается, второй - перемещение жидкой влаги в сверхсорбционной зоне.

В.Г. Гагариным предложено обобщение модели, принятой в методе последовательного увлажнения. В его модели, основанной на уравнении влагопереноса (3), дополнительно учитываются: перемещение незамерзшей влаги при отрицательных температурах; зависимость изотерм сорбции (десорбции) материалов от температуры; увлажнение поверхности ограждений косыми дождями; зависимость скорости капиллярного всасывания материалов от влажности и температуры; зависимость коэффициентов паропроницаемости от влажности и коэффициентов влагопроводности от температуры. На основе этой модели разработана компьютерная программа [52] для расчета нестационарного влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий, которая включена в ГОСТ 32494–2013 «Здания и сооружения. Метод математического моделирования температурно-влажностного режима ограждающих конструкций». По сравнению с оценкой влажностного состояния ограждающих конструкций по стационарным условиям эксплуатации моделирование нестационарного влажностного режима дает более точные сведения о влажности материалов конструкций и о риске, связанном с проблемами конденсации пара на поверхности.

Развитию метода последовательного увлажнения К.Ф. Фокина посвящены работы [53-55].

В моделях, основанных на теории влагопроводности [56, 57], в качестве основных движущих сил влагопереноса приняты влагосодержание материала и температура. В изотермических условиях перемещение влаги при любом соотношении между парообразной и жидкостной фазами влаги происходит под действием градиента влагосодержания. В неизотермических условиях во влажном материале предполагают поток влаги, вызванный градиентом температуры [58]. Это явление, открытое А.В. Лыковым в 1935 г., называют термовлагопроводностью. Дифференциальное уравнение влагопереноса в этом случае имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial \omega}{\partial x} + k_t \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (4)$$

где k_m - диффузии влаги в материале, м²/с; k_t - термодиффузия влаги в материале, кг/(м·с·К).

В правой части (4) первый член учитывает суммарный перенос влаги (без разделения на отдельные фазы) в изотермических условиях, второй - влагоперенос в неизотермических условиях под действием градиента температуры.

Преимуществом моделей, основанных на теории влагопроводности, является возможность описать влагоперенос без точного знания физической основы процесса. Эта модель нашла широкое применение при исследовании высокоинтенсивных процессов влагопереноса в теории сушки [59], при моделировании массопереноса в технологических процессах строительной индустрии [60, 61], в физике почв [62, 63]. В расчетах влажностного режима ограждающих конструкций модель, основанная на теории влагопроводности, пока не нашла широкого практического применения ввиду сложности экспериментального определения коэффициентов влагопереноса, зависящих от влагосодержания и температуры.

Представляет интерес произвести пересчет этих характеристик на паропроницаемость и влагопроводность, которые содержатся в справочной литературе. Выполним следующие преобразования:

$$\begin{aligned} \mu \nabla p &= \mu \left(\frac{\partial p}{\partial \omega} \nabla \omega + \frac{\partial p}{\partial t} \nabla t \right) = \mu \left(\frac{\partial(\varphi p_s)}{\partial \omega} \nabla \omega + \frac{\partial(\varphi p_s)}{\partial t} \nabla t \right) = \\ &= \mu \left(p_s \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \nabla \omega + \varphi \frac{\partial p_s}{\partial t} \nabla t \right). \end{aligned}$$

С учетом перемещения жидкой фазы влаги получим:

$$\begin{aligned} \mu \nabla p + \beta \nabla \omega &= \left(\mu p_s \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} + \beta \right) \nabla \omega + \mu \varphi \frac{\partial p_s}{\partial t} \nabla t = k_m \nabla \omega + k_t \nabla t, \\ k_m &= \mu p_s \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} + \beta, \quad k_t = \mu \varphi \frac{\partial p_s}{\partial t}. \end{aligned}$$

В зарубежной практике модели на основе теории влагопроводности использовали Phillip J.R. и de Vries D.A. [64], R. Kohonen и J. Maatta [65], D. Gavin и P. Klemm [66], C. Rode [67] и другие ученые.

По аналогии с методами теории сушки А.У. Франчук предложил рассчитывать нестационарный теплоперенос совместно с расчетом влагопереноса в ограждении. Теоретические разработки А.У. Франчука базируются на экспериментальных и теоретических исследованиях О.Е. Власова и Р.Е. Брилинга о переносе в строительных материалах жидкой влаги. Методы, разработанные А.У. Франчуком, пригодны для расчета как сорбционного, так и сверхсорбционного увлажнения материалов [68, 69]. В этих методах учитываются зависимости коэффициентов влагопереноса материалов от влагосодержания и температуры. Однако методы А.У. Франчука сильно формализованы, что затрудняет их использование в практических расчетах. Развитию методов А.У. Франчука посвящены работы его учеников - В.И. Лукьянова [69], Ю.Д. Ясина [70], О.В. Дегтярева [71].

Выбор математической модели влагопереноса, в которой нашли бы отражение все механизмы переноса влаги, имеет определяющее значение. В.И. Лукьяновым для решения задач влажностного режима приводится следующее уравнение влагопереноса:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \operatorname{div} \left(k_\omega \nabla \omega + k_t \nabla t + k_p \nabla p + k_P \nabla P \right), \quad (5)$$

где ω - концентрация влаги в материале, кг/м³; t - температура, °С; p - парциальное давление водяного пара в материале, Па; P - давление воздуха, Па; k_ω , k_t - соответственно диффузия, м²/с, и термодиффузия, кг/(м·с·К), жидкой фазы влаги в материале; k_p - диффузия водяного пара в материале, кг/(м·с·Па); k_P - фильтрации влажного воздуха в материале, кг/(м·с·Па).

Уравнение (5) учитывает различные факторы, влияющие на нестационарный влагоперенос. В уравнении нестационарной теплопроводности также учитывается теплота фазовых переходов влаги. В дальнейшем В.И. Лукьянов усовершенствовал модель, разработав многофакторный метод, который учитывает практически все факторы, влияющие на тепловлажностный режим ограждения, в том числе, наряду с переносом жидкой и парообразной влаги, а также влажного воздуха дополнительно учитываются влияние засоления материалов и возможного образования трещин в стыковых соединениях и перенос водорастворимых компонентов. Использование метода В.И. Лукьянова дает возможность определять двумерные влажностные поля, например, в зоне стыковых соединений панелей, ограждений с вентилируемыми прослойками. Решение этой многофакторной задачи требует экспериментального определения многочисленных характеристик тепловлагопереноса. Сложность их определения затрудняет применение этой модели на практике.

Главная трудность при использовании моделей на основе влагосодержания заключается в разрывности функции влагосодержания на стыках различных материалов. Это приводит к необходимости задания сложных граничных условий. Так К.Ф. Фокин предположил [1], что влага, конденсирующаяся на стыке двух материалов, распределяется между материалами пропорционально их среднесуточным скоростям капиллярного всасывания. Вопрос о скорости капиллярного всасывания влаги материалами изучался Р.Е. Брилингом, им были проведены опыты по определению скорости капиллярного всасывания для ряда строительных материалов [51]. W. Sammerer показал [72], что количество впитанной телом влаги пропорционально \sqrt{t} . Позднее Н. Künzel [73] и В. Schwarz [74] экспериментально определили величину коэффициента капиллярного всасывания для ряда строительных материалов. На основании закономерностей движения жидкости по капиллярам В.Г. Гагарин предложил общее уравнение капиллярного всасывания воды строительными материалами. Использование коэффициента капиллярного всасывания более обоснованно для характеристики процесса по сравнению со средней суточной скоростью капиллярного всасывания воды. Ю.Д. Ясин предложил рассчитывать равновесную влажность исходя из равенства капиллярных давлений в соприкасающихся материалах [70]. А.Г. Перехоженцев показал [75], что влагосодержания соприкасающихся материалов в сверхсорбционной области их увлажнения связаны между собой линейно.

Наиболее просто равновесное влагосодержание на стыке материалов определяется на основе теории потенциала влажности.

В теории потенциала влажности, разработанной В.Н. Богословским, поток влаги в ограждении не разграничивается на отдельные составляющие. Этот потенциал учитывает практически все механизмы переноса влаги в материалах наружных ограждений, что позволяет достаточно просто записать уравнение теплопроводности [44]:

$$\eta \rho_0 \frac{\partial \Theta_B}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial \Theta_B}{\partial x} \right), \quad (6)$$

где Θ_B - полный потенциал влажности В.Н. Богословского, °В; η - удельная влагоемкость материала, (кг/кг)/°В; κ - теплопроводность материала, кг/(м·с·°В).

Уравнение теплопроводности (6) полностью аналогично уравнению теплопроводности, поэтому для его решения можно использовать хорошо разработанные методы теории теплопроводности. Потенциал влажности В.Н. Богословского позволяет очень просто записать условие распределения влаги на стыке различных материалов, считая, что величины потенциала влажности обоих материалов одинаковы. Потенциал влажности Θ_B позволяет сравнительно просто описать математически сложный процесс нестационарной влагопередачи в многослойных конструкциях, находящихся в неизотермических условиях, во всем диапазоне влажности. Сложность зависимости $w(\Theta_B, t)$ а также отсутствие достаточного количества экспериментальных данных по характеристикам состояния и переноса влаги в материалах сдерживает широкое применение этой модели на практике.

А.В. Лыков предложил модель, в которой все виды влагопереноса (при постоянном внешнем давлении) могут быть описаны с помощью двух термодинамических движущих сил: градиента изотермического потенциала влагопереноса $\nabla \Theta_L$ и градиента температуры ∇t в виде [56]:

$$c_m \rho_0 \frac{\partial \Theta_L}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda_m \nabla \Theta_L + \lambda_m \delta_m \nabla t), \quad (7)$$

где c_m - удельная изотермическая влагоемкость (массоёмкость) материала, (кг/кг)/°М; Θ_L - изотермический потенциал влагопереноса А.В. Лыкова, °М; λ_m - изотермическая теплопроводность кг/(м·с·°М); δ_m - термоградиентный коэффициент, °М/°С.

Уравнение (7) учитывает перенос влаги в изотермических условиях (первый член в правой части уравнения) и перенос влаги в неизотермических условиях (второй член).

Достоинством данной модели является использование потенциала влагопереноса, что позволяет упростить запись граничных условий на стыках разных материалов конструкции. Однако, наличие в уравнении влагопереноса дополнительного слагаемого, определяющего термовлагопроводность, существенно усложняет решение этого уравнения.

А.Г. Перехоженцев разработал шкалу относительного изотермического потенциала влагопереноса и предложил модель влагопереноса [75], в основе которой лежит дифференциальное уравнение вида:

$$c_{\Theta} \rho_0 \frac{\partial \Theta_o}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda_{\Theta} \nabla \Theta_o) + W_t, \quad (8)$$

с источником (стоком) влаги за счет градиента температуры

$$W_t = \text{div}(\lambda_{\Theta} \delta_{\Theta} \nabla t),$$

где c_{Θ} - удельная изотермическая влагоемкость материала, (кг/кг)/°В; ρ_0 - плотность материала в сухом состоянии, кг/м³; Θ_o - относительный потенциал влагопереноса, °В; τ - время, с; λ_{Θ} - изотермическая

влажностепроводность материала, кг/(м·с·°C); δ_{ω} - термоградиентный коэффициент, °C/°C, позволяющий поток влаги определить через градиент температуры.

Для определения температурно-влажностного режима ограждающих конструкций уравнение влагопереноса (8) решают совместно с нестационарным уравнением теплопроводности. Такое представление модели позволяет составить четкий алгоритм решения системы, в которой вначале решается уравнение теплопроводности, затем по известному температурному полю определяется величина W_i , далее по аналогии с уравнением теплопроводности решается уравнение влагопроводности (8) с известным источником (стоком) влаги за счет градиента температуры. Характеристики влагопереноса, отнесенные к потенциалу, могут быть получены расчетным путем [75] с использованием изотермы капиллярного испарения (десорбции) от полного насыщения материала на основе представления модели пористого строительного материала как дисперсной системы для широкого класса материалов. Переход от потенциалов влагопереноса к равновесным влагосодержаниям материалов осуществляют в конце решения задачи. Систему дифференциальных уравнений нестационарной тепло- и влагопроводности решают методом конечно-разностной аппроксимации с использованием схемы продольно-поперечной прогонки. На основе данной модели разработана компьютерная программа расчета двумерных нестационарных температурно-влажностных полей неоднородных участков наружных ограждений [75].

К. Кієβі предложил модель [76], в которой процесс влагопереноса разбит на две отдельные составляющие - перенос пара и жидкости. Процесс диффузии водяного пара также разбита на две части - «температурную», учитывающую перенос пара за счет градиента температуры (термодиффузия пара) и «влажностную» за счет градиента относительной влажности воздуха в материале. Для капиллярного переноса жидкой фазы влаги К. Кієβі ввел новый независимый от материала потенциал влажности ϕ . Величина ϕ названа им обобщенным потенциалом влажности (generalized moisture potential). Этот потенциал равен относительной влажности воздуха в области сорбционного увлажнения материалов, а в сверхсорбционной области он представляет собой некоторую функцию распределения пор по радиусам. Уравнение влагопереноса в данной модели имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \text{div} \left[\text{FKU} \frac{d\omega}{d\phi} \nabla \phi + \rho_w (\text{FDP} \cdot \nabla \phi + \text{FDT} \cdot \nabla t) \right], \quad (9)$$

где ω - концентрация влаги в материале, кг/м³; ϕ - потенциал влажности К. Кієβі; ρ_w - плотность воды, кг/м³; ϕ - относительная влажность воздуха; t - температура, °C; FKU - коэффициент диффузии капиллярной влаги, м²/с; FDP - коэффициент диффузии пара в изотермических условиях, м²/с; FDT - коэффициент термодиффузии пара, м²/(с·K).

Первый член в правой части (9) учитывает перенос жидкой фазы влаги при любых температурных условиях, второй - перенос пара в изотермических условиях, третий - перенос пара под действием градиента температуры. На основе данной модели разработана компьютерная программа, с помощью которой были определены профили влагосодержания различных конструкций наружных стен и крыш зданий. Различные модификации модели К. Кієβі подробно рассмотрены в работе [77]. Недостатком модели является большая трудоемкость экспериментального определения коэффициентов влагопереноса FDP и FDT.

В физике почв широко применяют модель, в которой влагоперенос описывается с помощью двух термодинамических движущих сил: градиента парциального давления водяного пара ∇p , определяющего диффузию пара, и градиента капиллярного давления ∇p_k , характеризующего перенос жидкой фазы влаги. В основе этой модели лежит дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \text{div} (\mu \nabla p - k_p \nabla p_k), \quad (10)$$

где μ - паропроницаемость материала, кг/(м·с·Па); p - парциальное давление водяного пара в материале, Па; k_p - капиллярная проводимость влаги, кг/(м·с·Па); p_k - капиллярное давление, Па.

В уравнении (10) капиллярное давление принято в качестве потенциала переноса жидкости. Капиллярное давление является удобным измерителем состояния влаги в материале в области сверхсорбционного увлажнения. Главное преимущество данной модели заключается в том, что равновесное влагосодержание на стыке разных материалов можно определить исходя из равенства капиллярных давлений. Это позволяет значительно упростить граничные условия. К недостаткам модели (10) можно отнести некоторое неудобство практического применения шкалы капиллярного давления как потенциала влажности, поскольку с ростом капиллярного давления влагосодержание уменьшается.

Н.М. Künzel показал [77, 78], что капиллярное давление (до предела капиллярной насыщенности) может быть вычислено по относительной влажности воздуха в порах материала с помощью уравнения Кельвина:

$$p_k = -\rho_w R_D T \ln \phi,$$

где ρ_w - плотность воды, кг/м³; R_D - газовая постоянная водяного пара, Дж/(кг·К); T - температура, К; φ - относительная влажность воздуха.

Используя уравнение Кельвина, можно преобразовать второй член в правой части уравнения (10) следующим образом:

$$k_p \nabla p_k = k_p \left(\frac{\partial p_k}{\partial \varphi} \nabla \varphi + \frac{\partial p_k}{\partial T} \nabla T \right) = -k_p \rho_w R_D \left(\frac{T}{\varphi} \nabla \varphi + \ln \varphi \nabla T \right).$$

Пренебрегая вторым членом правой части этого выражения, учитывающим перенос капиллярной влаги за счет градиента температуры ($\ln \varphi \nabla T = 0$), после подстановки в уравнение (10) получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\mu \nabla p + k_\varphi \nabla \varphi), \quad (11)$$

$$k_\varphi = \frac{k_p \rho_w R_D T}{\varphi} \nabla \varphi - \text{коэффициент переноса жидкой влаги, м}^2/\text{с}.$$

Модель на основе уравнения влагопереноса (11) предложена Н.М. Künzel'ем [77]. В этом уравнении отдельно учитывается диффузия водяного пара (первый член в правой части уравнения) и перенос жидкой влаги (второй член). Таким образом, влагоперенос описывается с помощью двух термодинамических движущих сил: градиента парциального давления водяного пара ∇p и градиента относительной влажности воздуха $\nabla \varphi$. Эти параметры просты в измерении и хорошо представлены в справочной литературе. Другим преимуществом данной модели является достаточно простая запись граничных условий. Недостатком модели является резкий рост влагосодержания при малом изменении φ в области сверхсорбционного увлажнения материалов, что существенно влияет на точность определения влагосодержания в этом диапазоне. Уравнение влагопроводности (11) решается совместно с уравнением теплопроводности методом конечных разностей по неявной схеме аппроксимации. С помощью разработанной модели Н. Künzel'ем решена двумерная задача нестационарного тепло- и влагопереноса.

С.В. Корниенко разработал метод расчета температурно-влажностного режима в трехмерных областях ограждающих конструкций [79] на основе новой шкалы абсолютного потенциала влажности. Математическая модель рассматриваемого процесса описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка параболического типа с переменными коэффициентами:

$$C_h(t, \theta) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda_h(t, \theta) \nabla t), \quad (12)$$

$$C_m(t, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda_m(t, \theta) \nabla \theta), \quad (13)$$

с краевыми условиями.

В формулах (12) и (13) приняты следующие обозначения: t - температура, °С; θ - абсолютный потенциал влажности, кДж/кг; τ - время, с; C_h - объемная теплоемкость материала, Дж/(м³·К); C_m - объемная влагоемкость материала, кг/[(м³·(кДж/кг))].

Численное решение задачи получено методом конечно-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений с применением неявной разностной схемы [80]. Указанная математическая модель реализована в компьютерной программе «Совместный влаготеплоперенос (СОВТ-3)» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611175 от 04.02.2011). Основными достоинствами модели и компьютерной программы являются: использование шкалы неизотермического абсолютного потенциала влажности, что позволяет упростить математическую модель тепловлагопереноса и дает возможность производить расчет в широком диапазоне влажности материалов; возможность исследования динамики температурно-влажностного режима ограждений сложной геометрической структуры при переменных воздействиях климата и микроклимата помещений; применимость для исследования тепловых и влажностных процессов различной интенсивности; возможность задания неравномерной пространственно-временной сетки для оптимизации вычислительного процесса. На основе математического моделирования нестационарного тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях показано, что в краевых зонах ограждений происходит локализация температуры и влагосодержания с образованием сложных краевых эффектов, обусловленных совместным влиянием процессов тепло- и влагопереноса [81, 82]. Более 40% общих тепловых потерь ограждения отмечается через теплотехнически неоднородные участки (краевые зоны). Локализация влаги на этих участках выше допустимых значений приводит к ухудшению влажностного режима, снижая

теплозащиту и срок эксплуатации всего здания. Проведена верификация указанного метода расчета различными способами: на аналитическом решении и последовательности пространственных и временных сеток, на различных математических моделях влагопереноса, на результатах, проведенных автором натурных исследований температурно-влажностного режима и теплозащитных свойств ограждающих конструкций. Верификация метода подтверждает его достоверность [83], что позволяет использовать этот метод в проектной практике [84-87].

Заклучение

По итогам аналитического обзора архивных научных источников и документов за период с 1925 по 2019 г.г. определен вектор развития методов расчета влагопереноса в ограждающих конструкциях. Проведен тематический анализ методов расчета с точки зрения физических процессов движения влаги, потенциалов и уравнений переноса. Выполнена систематизация математических моделей влагопереноса.

Показаны преимущества математических моделей влагопереноса, основанных на теории потенциала влажности. Применение этой теории позволяет существенно упростить математическую модель влагопереноса и описать процесс в широком диапазоне влажности и температуры с учетом перемещения влаги в парообразном и жидком состояниях под действием различных сил. Потенциал влажности дает возможность очень просто записать условие распределения влаги на стыке различных материалов, считая, что величины потенциала влажности обоих материалов одинаковы. Единство явлений тепло- и массообмена позволяет строить математические модели влагопереноса в ограждающих конструкциях, используя известные методы теории теплопроводности.

Следует отметить большой вклад в создание теоретических основ и методов расчета влажностного режима ограждающих конструкций отечественных ученых, работы которых обеспечили нашей стране приоритет и ведущее положение в мировой науке.

Установлено, что методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций получили широкое применение мировой практике [88-105] при решении конкретных прикладных задач строительной теплофизики, однако единой теории влагопереноса пока не создано. Это позволяет сделать вывод о том, что разработка теории и методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций актуальна и перспективна.

Литература / References

- [1]. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ogradhdayushchikh chastey zdaniy. Moscow: ABOK-PRESS; 2006.
- [2]. Bogoslovskiy V.N. Osnovy teorii potentsiala vlazhnosti materiala primenitel'no k naruzhnym ogradhdeniyam obolochki zdaniy. Moscow: MGSU; 2013.
- [3]. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M., Shilkin N.V. Energoeffektivnye zdaniya. Moscow: ABOK-PRESS; 2003.
- [4]. Savin V.K. Stroitel'naya fizika: energoperenos, energoeffektivnost', ener-gosberezhenie. Moscow: Lazur'; 2005.
- [5]. Ananyev A.I. Humidity Conditions and Useful Life of Outside Walls of Buildings. ABOK. 2018; 8: 32–39.
- [6]. Machinskiy V.D. O kondensatsii parov vozdukh v stroitel'nykh ogradhdeniyakh. Stroitel'naya promyshlennost'. 1927; 1: 60–62.
- [7]. Borshchevskiy A.N. Prichiny porazheniya zdaniy domovymi gribami. Moscow–Leningrad; 1932.
- [8]. Fokin K.F. Raschet vlazhnostnogo rezhima naruzhnykh ogradhdeniy. Moscow–Leningrad: TsNIPS; 1935.
- [9]. Odel'skiy E.Kh. Grafoanaliticheskiy metod postroeniya teplovlazhnostnoy kha-rakteristiki derevyannykh pokrytiy. Minsk; 1937.
- [10]. Shklover A.M. O raschete uvlazhneniya naruzhnykh ogradhdeniy zdaniy metodom statsionarnogo rezhima. Stroitel'naya promyshlennost'. 1949; 7: 20–23.
- [11]. Ushkov F.V. Metod rascheta uvlazhneniya ogradhdayushchikh chastey zdaniy. Moscow: MKKh RSFSR; 1955.
- [12]. Il'inskiy V.M. Raschet vlazhnostnogo sostoyaniya ogradhdayushchikh konstruksiy pri diffuzii vodyanogo para. Promyshlennoe stroitel'stvo. 1962; 2: 223–228.
- [13]. Polikanov M.V. Teplotekhnicheskiy raschet ogradhdeniy vlazhnykh i mokrykh pomeshcheniy. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura. 1960; 1: 79–90.
- [14]. Perekhozhentsev A.G. Norming and Calculation of Vapor Permeability of Multi-Layer Building Enclosing Structures (Recommendations for Improving SP 50.13330.2012 "Thermal Protection of Buildings") Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2018; 3: 130–134. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-3-130-134>
- [15]. Andreev D.A., Mogutov V.A., Tsirlin A.N. Vybora raspolozheniya sloev ogradh-dayushchey konstruksii s uchetom predotvrashcheniya vnutrenney kondensatsii. Stroitel'nye materialy. 2001; 12: 42–45.
- [16]. Vytchikov Yu.S. Opredelenie ploskosti kondensatsii dlya mnogosloynnykh ogradhdayushchikh konstruksiy. Stroitel'nye materialy. 2006; 4: 92–94.

- [17]. Gagarin V.G., Zubarev K.P., Kozlov V.V. The Highest Moisture Area in Façade Heat-Insulation Composite Wall Systems with External Plastering. *Vestnik TGASU*. 2016. № 1. S. 125–132.
- [18]. Gagarin V.G., Kozlov V.V., Zubarev K.P. Analysis of the Zone Location of Maximum Moistening in the Wall System with Different Thickness of Insulation Layer. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2016; 6: 8–12.
- [19]. Glaser H. *Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen*. Kältetechnik Bd. II; 1959.
- [20]. Brandt J., Moritz H. *Bauphysik nach Maß: Planungshilfen für Hochbauten aus Beton*. Köln-Düsseldorf: Beton-Verl.; 1995.
- [21]. Berber J. *Bauphysik: Wärmetransport–Feuchtigkeit–Schall*. 4., neubearbeitete Auflage. Bernh. Friedr. Voigt. Hamburg; 1994.
- [22]. Bondi P., Stefanizzi P. Hygro-thermal performance of hollow bricks and current standards. *Energy and Buildings*. 2001; 33(7): 731–736.
- [23]. Brás A., Gonçalves F., Faustino P. Cork-based mortars for thermal bridges correction in a dwelling: Thermal performance and cost evaluation. *Energy and Buildings*. 2014; 72: 296–308.
- [24]. Cascone S., Catania F., Gagliano A., Sciuto G. Energy performance and environmental and economic assessment of the platform frame system with compressed straw. *Energy and Buildings*. 2018; 166: 83–92.
- [25]. Pavlík Z., Černý R. Experimental assessment of hygrothermal performance of an interior thermal insulation system using a laboratory technique simulating on-site conditions. *Energy and Buildings*. 2008; 40(5): 673–678.
- [26]. Stazi F., Di Perna C., Munafò P. Durability of 20-year-old external insulation and assessment of various types of retrofitting to meet new energy regulations. *Energy and Buildings*. 2009; 41(7): 721–731.
- [27]. Korniyenko S. Advanced Hygrothermal Performance of Building Component at Reconstruction of S. Radonezhskiy Temple in Volgograd. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 53,01003.
- [28]. Zhang H.L., Marci W.M., Fu X.Z. Modeling of the hygrothermal absorption and desorption for underground building envelopes. *Energy and Buildings*. 2010; 42(8): 1215–1219.
- [29]. Arslan O., Kose R. Thermoeconomic optimization of insulation thickness considering condensed vapor in buildings. *Energy and Buildings*. 2006; 38(12): 1400–1408.
- [30]. Kong F., Wang H. Heat and mass coupled transfer combined with freezing process in building materials: Modeling and experimental verification. *Energy and Buildings*. 2011; 43: 2850–2859.
- [31]. Lucas F., Adelard L., Garde F., Boyer H. Study of moisture in buildings for hot humid climates. *Energy and Buildings*. 2002; 34(4): 345–355.
- [32]. Zacà I., D'Agostino D., Congedo P.M., Baglivo C. Assessment of cost-optimality and technical solutions in high performance multi-residential buildings in the Mediterranean area. *Energy and Buildings*. 2015; 102: 250–265.
- [33]. Chung W.J., Lim J.-H. Cooling operation guidelines of thermally activated building system considering the condensation risk in hot and humid climate. *Energy and Buildings*. 2019; 193: 226–239.
- [34]. Sovetnikov D.O., Baranova D.V., Borodinecs A., Korniyenko S.V. Technical problems in churches in different climatic conditions. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018; 1(64): 20–35.
- [35]. Gamayunova O., Musorina T., Ishkov A.D. Humidity distributions in multilayered walls of high-rise buildings. *E3S Web of Conferences*. 2018; 02045.
- [36]. Kupriyanov V.N. Improved Calculation Method for Protection Against Strong Moistening of an Enclosing. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2017; 5: 38–43.
- [37]. Perekhozhentsev A.G. On the Need to Adjust Construction Rules SP 50.13330.2012 "Thermal Protection of Buildings". *ABOK*. 2017; 8: 54–57.
- [38]. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Petrichenko M.R., Gorshkov A.S. Evaluation of Hygrothermal Performance of Multilayered Wall Design in Annual Cycle. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015; 6: 19–33.
- [39]. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Assessment of moisture conditions of walls with facade's thermo-insulation composite. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016; 6(45): 34–54.
- [40]. Kornienko S.V. Improvement of the Russian norms on moisture protection of the building envelope components. *Vestnik VSTU*. 2017; 47(66): 18–29.
- [41]. Kornienko S.V. Specification of indoor climate design parameters at the assessment of moisture protective properties of enclosing structures. *Vestnik MGSU*. 2016; 11: 132–145.
- [42]. Korniyenko S.V. Suggestions about Correction of SP 50.13330.2012 Concerning Protection of Enclosing Structures Against Overwetting. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2015; 7: 31–34.
- [43]. Bogoslovskiy V.N. O potentsiale vlazhnosti. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 1965; 8 (2): 216–222.
- [44]. Bogoslovskiy V.N. *Teplovoy rezhim zdaniya*. Moscow: Stroyizdat; 1979.
- [45]. Kornienko S.V. *Inzhenernyy metod opredeleniya ploskosti naibol'shego uvlazhneniya dlya ograzhdayushchikh konstruktsiy. Stroitel'nye materialy*. 2007; 6: 50–51.
- [46]. Epshteyn A.S. *Raschet kondensatsionnogo uvlazhneniya konstruktsiy. Proekt i standart*. 1936; 11: 10–14.
- [47]. Fokin K.F. *Raschet posledovatel'nogo uvlazhneniya materialov v naruzhnykh ograzhdeniyakh*. Moscow–Leningrad: TsNIPS; 1941.
- [48]. Vlasov O.E. *Osnovy stroitel'noy teplotekhniki*. Moscow: Izdatel'stvo VIA; 1938.

- [49]. Fokin K.F. Utochnenny metod rascheta vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruksiy. Kholodil'naya tekhnika. 1955; 3: 28–32.
- [50]. Vlasov O.E. Osnovy teorii kapillyarnoy diffuzii. Moscow: Steklograficheskoe izdanie TsNIPS; 1940.
- [51]. Briling R.E. Migratsiya vlagi v stroitel'nykh ograzhdeniyakh. Moscow–Leningrad: TsNIPS; 1949.
- [52]. Gagarin V.G., Zubarev K.P. Moisture potential theory application for modelling of enclosing structure unsteady-state moisture regime. Vestnik MGSU. 2019; 14(4): 484–495. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.484-495
- [53]. Vasilyev G.P., Lichman V.A., Kolesova M.V., Peskov N.V., Brodach M.M., Ta-bunshchikov Y.A. Simulation of heat and moisture transfer in a multiplex structure. Energy and Buildings. 2015; 86: 803–807.
- [54]. Vasil'yev G.P., Lichman V.A., Peskov N.V. Modelirovanie protsessa sushki ograzhdayushchikh konstruksiy zdaniy. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2013; 7: 21–26.
- [55]. Vasilyev G.P., Lichman V.A., Peskov N.V., Brodach M.M., Tabunshchikov Y.A., Kolesova M.V. Simulation of heat and moisture transfer in a multiplex structure. Energy and Buildings. 2014; 68: 803–807.
- [56]. Lykov A.V. Teoreticheskie osnovy stroitel'noy teplofiziki. Minsk: Izdatel'stvo Akad. nauk BSSR; 1961.
- [57]. Lykov A.V. Masso- i teploperenos v stroitel'nykh materialakh. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. 1965; 8(2): 161–169.
- [58]. Lykov A.V. O termicheskoy diffuzii vlagi. Zhurnal prikladnoy khimii. 1935; 8(8): 1354–1359.
- [59]. Lykov A.V. Teoriya sushki. Moscow: Energiya; 1968.
- [60]. Fedosov S.V., Ibragimov A.M. Nestatsionarnyy teplo- i massoperenos v mnogoslonykh ograzhdayushchikh konstruksiyakh. Stroitel'nye materialy. 2006; 4: 86–87.
- [61]. Fedosov S.V., Ibragimov A.M., Gushchin A.V. Primenenie metodov matematicheskoy fiziki dlya modelirovaniya masso- i energoperenosa v tekhnologicheskikh protsessakh stroitel'noy industrii. Stroitel'nye materialy. 2008; 4: 65–67.
- [62]. Dolgov S.I. Issledovaniya podvizhnosti pochvennoy vlagi i ee dostupnosti dlya rasteniy. Moscow–Leningrad: Akad. nauk SSSR; 1948.
- [63]. Globus A.M. Fizika neizotermicheskogo vnutripochvennogo vlagobmena. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1983.
- [64]. Phillip J.R., De Vries D.A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Transactions, American Geophysical Union 38. 1957; 2: 222–232.
- [65]. Kohonen R., Maatta J. Transient analysis of the thermal and moisture physical behaviour of the building constructions. Research Reports. Espoo; 1983.
- [66]. Gawin D., Klemm P. Model sprzezonego transportu masy i energii w osrodkach kapilarno-porowatych. Materialy konferencyjne. Łódź; 1989.
- [67]. Rode C., Burch D.M. Empirical validation of a transient computer model for combined heat and moisture transfer. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Building VI, December 4–8. Clearwater Beach, FL; 1995.
- [68]. Franchuk A.U. Voprosy teorii i rascheta vlazhnosti ograzhdayushchikh chastey zdaniy. Moscow: Stroyizdat; 1957.
- [69]. Franchuk A.U. Issledovanie perenosa vlagi v stroitel'nykh materialakh. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. 1960; 3(12): 99–102.
- [70]. Yasin Yu.D. Termodinamicheskaya interpretatsiya matematicheskoy modeli ravnovesnogo sostoyaniya faz vlagi v kapillyarno-poristykh materialakh. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. 1984; 47(3): 221–228.
- [71]. Yasin Yu.D., Degtyarev O.V. Sravnitel'naya otsenka sposobov opredeleniya kriogennykh fazovykh prevrashcheniy vlagi v stroitel'nykh materialakh. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. 1972; 23(1).
- [72]. Cammerer W. Die Kapillare Flüaligkeitsbewegung in porösen Körpern. VDI-Forschungst. 1965; 500: 37.
- [73]. Künzel H. Gasbeton. Wärme- und Feuchtigkeitsverhalten. Wiesbaden, Berlin; 1970.
- [74]. Schwarz B. Kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen. Gesundheits- Ingenieur. 1972; 93(7): 206–211.
- [75]. Perekhozhentsev A.G. Voprosy teorii i rascheta vlazhnostnogo sostoyaniya neodnorodnykh uchastkov ograzhdayushchikh konstruksiy zdaniy. Volgograd: VolgGASA; 1997.
- [76]. Kießl K. Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bau-teilen. Essen; 1983.
- [77]. Künzel H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Stuttgart: IRB Verl.; 1995.
- [78]. Künzel H.M., Kießl K. Calculation of heat and moisture transfer in exposed build-ing components. International Journal of heat and mass transfer. 1997; 1: 159–167.
- [79]. Kornienko S.V. Metod resheniya trekhmernoy zadachi sovmeznogo nestatsionarnogo teplo- i vlagoperenosa dlya ograzhdayushchikh konstruksiy zdaniy. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2006; 2(566): 108–110.
- [80]. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. Vychislitel'naya teploperedacha. Moscow: Editorial URSS; 2003.
- [81]. Korniyenko S.V. Kompleksnaya otsenka teplozashchity ograzhdayushchikh konstruktsiy obolochki zdaniya. Magazine of Civil Engineering. 2012; 7(33): 43–49.
- [82]. Korniyenko S.V. Settlement and experimental control of energy saving for build-ings. Magazine of Civil Engineering. 2013; 43(8): 24–30.

- [83]. Korniyenko S.V. Otsenka vliyaniya kraevykh zon ogradhdayushchikh konstruktsey na teplozashchitu i energoeffektivnost' zdaniy. Magazine of Civil Engineering. 2011; 8(26): 5–12.
- [84]. Korniyenko S.V. Testirovanie metoda rascheta temperaturno-vlazhnostnogo rezhima ogradhdayushchikh konstruktsey na rezul'tatakh naturnykh izmereniy parametrov mikroklimata pomeshcheniy. Magazine of Civil Engineering. 2012; 2(28): 18–23.
- [85]. Korniyenko S.V. Multifactorial forecast of thermal behavior in building envelope elements. Magazine of Civil Engineering. 2014; 52(8): 25–37.
- [86]. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Thermophysical field testing of resi-dential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks. Magazine of Civil Engineering. 2016; 64(4): 10–25.
- [87]. Korniyenko S.V. Renovation of Residential Buildings of the First Mass Series. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018; 463(2): 022060.
- [88]. Maref W., Van Den Bossche N., Armstrong M. Condensation risk assessment on box windows: the effect of the window-wall interface. Journal of Building Physics. 2012. 36: 35–56.
- [89]. Mlakar J., Štrancar J. Temperature and Humidity Profiles in Passive-house Build-ing Blocks. Building and Environment. 2013; 60: 185–193.
- [90]. Dos Santos G.H., Mendes N. Heat, Air and Moisture Transfer through Hollow Po-rous Blocks. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009; 52(9–10): 2390–2398.
- [91]. Teodosiu R. Integrated Moisture (Including Condensation) - Energy - Airflow Model within Enclosures. Building and Environment. 2013; 61: 197–209.
- [92]. D'Agostino D. Moisture dynamics in an historical masonry structure: The Cathedral of Lecce (South Italy). Building and Environment. 2013; 63: 122–133.
- [93]. Vatin N.I., Nemova D.V., Murgul V. Reconstruction of administrative buildings of the 70's: The possibility of energy modernization. Journal of Applied Engineering Science. 2014; 1: 37–44.
- [94]. Vatin N.I., Nemova D.V., Tarasova D.S., Staritsyna A.A. Increase of Energy Efficiency for Educational Institution Building. Advanced Materials Research. 2014; 953–954: 854–870.
- [95]. Vatin N.I., Nemova D.V., Kazimirova A.S., Gureev K.N. Increase of Energy Efficiency of the Building of Kindergarten. Advanced Materials Research. 2014; 953–954: 1537–1544.
- [96]. Vatin N.I., Gorshkov A.S., Nemova D.V., Staritsyna A.A. The Energy-Efficient Heat Insulation Thickness for Systems of Hinged Ventilated Facades. Advanced Materials Research. 2014; 941–944: 905–920.
- [97]. Alihodzic R., Murgul V., Vatin N., Aronova E. Renewable Energy Sources Used to Supply Pre-School Facilities with Energy in Different Weather Conditions. Applied Mechanics and Materials. 2014; 624: 604–612.
- [98]. Korniyenko S. Complex analysis of energy efficiency in operated high-rise resi-dential building: Case study. E3S Web of Conferences. 2018; 33,02005.
- [99]. Korniyenko S. Evaluation of thermal performance of residential building envelope. Procedia Engineering. 2015; 117(1): 191–196.
- [100]. Korniyenko S.V. The experimental analysis and calculative assessment of building energy efficiency. Applied Mechanics and Materials. 2014; 618: 509–513.
- [101]. Musorina T., Olshevskiy V., Ostrovaia A., Statsenko E. Experimental assessment of moisture transfer in the vertical ventilated channel. MATEC Web of Conferences. 2016; 02002.
- [102]. Olshevskiy V., Statsenko E., Musorina T., Nemova D., Ostrovaia A. Moisture transfer in ventilated facade structures. MATEC Web of Conferences. 2016; 01010.
- [103]. Statsenko E.A., Ostrovaia A.F., Musorina T.A., Kukolev M.I., Petrichenko M.R. The elementary mathematical model of sustainable enclosing structure. Magazine of Civil Engineering. 2016; 8(68): 86–91.
- [104]. Petrichenko M.R., Nemova D.V., Kotov E.V., Tarasova D.S., Sergeev V.V. Ventilated facade integrated with the HVAC system for cold climate. Magazine of Civil Engineering. 2018; 1(77): 47–58.

Контактная информация

1.* +79884912459, svkorn2009@yandex.ru
Сергей Валерьевич Корниенко, д.т.н., профессор

Contact information

1.* +79884912459, svkorn2009@yandex.ru
Sergey Korniyenko, Dr. Techn. Sciences, Professor