ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

В ноябре 2000 г. Вячеслав Николаевич Богословский передал мне для критического рассмотрения свой труд «Основы теории потенциала влажности применительно к наружным ограждениям оболочки здания». Сразу взяться за эту серьезную работу не удалось. А в начале следующего года Вячеслав Николаевич ушел из жизни.

Работа В.Н. Богословского не потеряла своей актуальности до сих пор. Внимание к влажностным процессам в наружных ограждающих конструкциях с введением в жизнь увеличенной теплозащиты зданий и необходимости применения многослойных ограждений только усилилось.

В этом году исполнилось 90 лет со дня рождения Вячеслава Николаевича. К этой дате подготовлена к изданию его монография, которая сопровождена историей развития понятия потенциала влажности до и после В.Н. Богословского, раскрывающая фундаментальный характер его вклада в науку. Кроме того, в книгу включены рассказ о жизненном пути Вячеслава Николаевича, некоторые воспоминаниям его учеников и соратников о нем и фотографии, запечатлевшие жизнелюбивого, умного, красивого человека.

Член-корреспондент РААСН, профессор,
доктор технических наук, заведующий лабораторией
строительной теплофизики НИИСФ РААСН,
заведующий кафедрой отопления
и вентиляции ФГБОУ ВПО «МГСУ» В.Г. Гагарин

профессор, доктор технических наук, академик РААСН
Вячеслав Николаевич Богословский (1923—2001)

ВЯЧЕСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ БОГОСЛОВСКИЙ

В.Н. Богословский родился в Москве 30 мая 1923 г.

В 1941 г. он поступил и в 1950 г. закончил МИСИ. В 1941—1944 гг. Вячеслав Николаевич Богословский сначала (1—3 июля 1941 г.) строил оборонительные рубежи под Рославлем (Смоленская обл.), а затем участвовал в боевых сражениях под Москвой, Ржевом. За ратные подвиги рядовой Богословский награжден Орденом Отечественной войны I степени и медалями.

По окончании аспирантуры при кафедре отопления и вентиляции МИСИ Богословский успешно защитил кандидатскую диссертацию, работал ассистентом и доцентом кафедры отопления и вентиляции. В 1956—1958 гг. участвовал во Второй комплексной антарктической экспедиции АН СССР. Им разработана физико-математическая модель термодинамического состояния ледника и дан прогноз динамики Антарктического ледникового щита.

В 1970 г. Вячеслав Николаевич защитил докторскую диссертацию «Тепловой режим зданий» и получил звание профессора. С 1967 по 1989 гг. В.Н. Богословский заведовал кафедрой отопления и вентиляции, семь лет был деканом факультета Теплогазоснабжения и вентиляции МИСИ.

«Понятия Богословского» — три задачи воздушного режима здания, два условия комфортности, обеспеченность параметров микроклимата — стали общепринятыми как в России, так и во всем мире. Известна созданная В.Н. Богословским школа строительной теплофизики. Вячеслав Николаевич Богословский постоянно руководил работой аспирантов и соискателей научных степеней. Он щедро делился своими знаниями и опытом. Им подготовлено 5 докторов и более 30 кандидатов наук. Усилиями профессора Богословского при кафедре были созданы и успешно работали две научно-исследовательские лаборатории, которые являлись материальной базой научно-иссследовательских работ кафедры. Начиная с 60-х гг. XX в., под научным руководством В.Н. Богословского в МИСИ—МГСУ получил развитие комплекс исследований теплофизических процессов в конструкциях зданий и сооружений при чрезвычайных ситуациях в случае пожара.

В те годы кафедра успешно сотрудничала со многими известными проектными и исследовательскими организациями Госстроя СССР, ГлавАПУ Мосгорисполкома и др. Долгое время кафедра по

договору о сотрудничестве с Норильским горно-металлургическим комбинатом вела работу по улучшению условий труда и повышению долговечности конструкций в условиях Заполярья. Под руководством профессора Богословского кафедра участвовала в работах по реконструкции уникальных объектов, таких как архитектурные памятники Кремля, по обоснованию ответственных проектных решений отопления и вентиляции многоэтажных зданий проспекта Калинина, зданий комплекса Чертаново Северное и других. В те же годы Вячеслав Николаевич Богословский работал по приглашению в Иллинойском техническом университете (США), в Ханойском университете (Вьетнам), в Дрезденском техническом университете (Германия). В.Н. Богословский — крупнейший специалист в области строительной теплофизики и тепломассообменных процессов в системах и аппаратах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Его многочисленные труды касаются широкого круга вопросов по специальности. Им создан курс и учебник по строительной теплофизике, дважды изданный в нашей стране, а также в Польше, Германии, Венгрии, Вьетнаме и Китае. Широко известны два условия комфортности в помещениях Богословского и коэффициент обеспеченности внутренних условий, введенный Богословским. Им опубликованы монографии «Тепловой режим зданий», «Основы теплофизики утилизаторов тепла СКМ здания» (в соавторстве с М.Я. Позом), которые изданы также в Польше и Венгрии. Он является соавтором и редактором фундаментальных учебников: «Отопление», «Вентиляция», «Кондиционирование воздуха и холодоснабжение», «Автоматизация инженерных систем» и «Энциклопедии по инженерному оборудованию зданий». Всего им опубликовано 12 монографий и учебников и более 250 докладов и статей.

Вячеслав Николаевич Богословский вел огромную общественную работу: он был членом двух Экспертных советов ВАК СССР, двух специализированных Советов по присуждению ученых степеней, советов института и факультета, Научно-технических советов Госстроя СССР, ряда НИИ. Он являлся председателем двух комиссий Минвуза СССР, членом редсовета Стройиздата и редколлегии журнала «Водоснабжение и санитарная техника». Неоднократно избирался председателем комитета НТО МИСИ. Был председателем комитета по строительной теплофизике ассоциации АВОК и являлся одним из инициаторов ее образования.

В последние годы Вячеслав Николаевич Богословский — профессор кафедры отопления и вентиляции МГСУ, главный научный сотрудник НИИ Строительной физики РААСН, действительный член РААСН — продолжал совмещать педагогическую работу с научно-исследовательской и научно-организационной. Его интересные решения сложнейших теплофизических задач пригодились в проектировании торгово-пешеходного моста Москвы-Сити «Багратион», Гостиного Двора, Храма Христа Спасителя и других новых строительных объектов Москвы.

Обладая широкой эрудицией в самых различных вопросах специальности, он по впервые услышанному устному докладу четко формулировал основные достоинства и недостатки работы и, при необходимости, намечал план доработки. Его мнением очень дорожили. На многочисленных совещаниях, конференциях, симпозиумах он всегда внимательно слушал всех выступавших. Его собственные выступления отличались масштабностью и позитивной конструктивностью, а в неофициальной обстановке юмором и оптимизмом.

Вячеслав Николаевич был патриотом родины, института, факультета, кафедры. В своем курсе «Введение в специальность» он не только рассказывал первокурсникам об истории развития науки и техники отопления и вентиляции, но и требовал от первокурсников знания наизусть гимна факультета ТГВ. Студенты его любили. И Богословский любил студентов, получая удовольствие не только от общения с ними, но и от чтения лекций. Четвертый этаж корпуса Г. Навстречу идет Вячеслав Николаевич с поднятыми руками, как ходят хирурги, готовые войти в операционную. Только руки белые от мела. «Как я сегодня прочитал лекцию!» — восторженно воскликнул он после приветствия.

С Вячеславом Николаевичем было приятно общаться. Он всегда умел вдохновить человека на работу, показать, что ничего не потеряно, часто указать путь, по которому надо идти. А поддержка лидера кафедры, факультета и вообще выдающегося человека (в чем ни у кого не возникало сомнений) в глазах подавляющего большинства людей многого стоила.

Вячеслав Николаевич ценил и умел пронести через всю жизнь дружбу военной и антарктической молодости. На кафедре отопления и вентиляции многие были свидетелями встречи перед 9 мая друзей, участвовавших в Великой отечественной войне: В.Н. Богословского, А.Г. Егиазарова, М.М. Баранова, Б.Д. Симакова,

Я.Г. Кронфельда, когда они собирались на кафедре и гурьбой шли в ресторан. Вячеслав Николаевич неоднократно рассказывал о практически ежегодных встречах участников Второй комплексной антарктической экспедиции АН СССР 1956—1958 гг.

Вячеслав Николаевич Богословский умел быть прекрасным рассказчиком. Впечатлительный и наблюдательный, он ярко и красиво описывал случаи из своей богатой событиями жизни. Он хорошо пел. Его любимой была песня военных лет «Бьется в тесной печурке огонь». В застольях Вячеслав Николаевич с удовольствием играл роль тамады и запевалы. Своим высоким тенором он мог перекрыть целый хор. Вячеслав Николаевич прекрасно танцевал и при случае любил, как он выражался, с куражом провести партнершу по залу. Свою спортивную форму он поддерживал ежедневными пробежками по Фрунзенской набережной и игрой в теннис. Ежегодно Богословский принимал участие в теннисном турнире МГСУ, еще в конце января он был на тренировке перед очередным турниром, который прошел 24—25 февраля 2001 г. без него.

До последних дней он был полон энергии и творческих планов. Обладая неугомонным жизнелюбивым характером, он старался заразить энтузиазмом окружающих. Излюбленным у Вячеслава Николаевича было изречение: «жизнь прекрасна и удивительна во всех ее проявлениях».

Неожиданная болезнь, с которой Вячеслав Николаевич мужественно боролся и которую надеялся в ближайшее время победить, вырвала его из жизни 23 февраля 2001 г. — в день его любимого праздника, который он всегда отмечал.

Профессор кафедры отопления и вентиляции
ФГБОУ ВПО «МГСУ»,
кандидат технических наук Е.Г. Малявина

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К НАРУЖНЫМ ОГРАЖДЕНИЯМ ОБОЛОЧКИ ЗДАНИЯ

1. ВВЕДЕНИЕ

Влажностный режим материала оболочки здания — наиболее сложный и противоречивый вопрос, составляющая общей тепломассообменной проблемы формирования тепловлажностного и воздушного режима вновь возводимого или реконструируемого здания. Имеется множество теорий и построений явления миграции влаги в материалах и влагопередачи наружных ограждений. Но далеко не все они позволяют правильно, надежно и во всей полноте провести расчет и прогнозировать влажностный режим материалов в конструкции в многообразных условиях реальной эксплуатации здания.

Материал ограждений здания подвергается увлажнению и высушиванию. Его влагосодержание зависит от особенностей материала, конструкции, от внешних и внутренних воздействий, времени эксплуатации и др. Один и тот же материал при разных условиях может иметь совершенно различные свойства проводимости и аккумуляции теплоты, стойкости и долговечности, которые зависят от структуры твердой части, ее минералогического состава, объемной массы и, что особенно важно для строительных материалов, от влажности. Таким образом, чтобы выполнить теплотехнический расчет, оценить долговечность, стойкость ограждения, нужно, прежде всего, знать его влажностный режим.

Наиболее правильно[1] влажностное состояние ограждений можно установить на основе использования понятия «потенциал влажности», которое было предложено в 1952 г. [3]. Ниже рассмотрены только принципиальные положения теоретических и экспериментальных исследований, связанных с потенциалом влажности, последних лет. В качестве примера использования теории потенциа-

[1] В данном месте следовало бы написать «наиболее полно...», поскольку пока не известны критерии «правильности установления влажностного состояния ограждений», помимо сопоставления результатов расчета с натурными данными. А указанные сопоставления выполнялись для различных теорий влагопереноса и давали приемлемое совпадение. — *Здесь и далее — прим. ред.*

ла влажности предложен метод оценки влажностного состояния материалов в ограждениях эксплуатируемых зданий.

В настоящее время понятие потенциал влажности стало использоваться очень широко во многих совершенно разноплановых методиках расчета влажностного режима конструкций. Чтобы исключить возможную путаницу необходимо дать полное название потенциала, который используется в предлагаемой нами теории. Здесь речь пойдет о построении теории влагопередачи на основе термодинамического полного неизотермического потенциала влажности. Далее в тексте для краткости используется название потенциал влажности.

2. ТЕРМОДИНАМИКА ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА В ОГРАЖДЕНИИ

Влага, поглощенная материалом, удерживается его твердой частью и воздухом, заполняющим поры. Молекулы воды взаимодействуют с молекулами материала и воздуха, кроме того, действуют молекулярные силы поверхностного натяжения.

Наиболее прочно влага в материале удерживается в случае, если влажность материала мала. В сильно увлажненном материале влага слабо связана с ним и сравнительно свободно перемещается. Прочность связи влаги с материалом зависит от ее количества, вида материала и других факторов. Наиболее полная система энергетической классификации форм связи влаги с материалом предложена академиком П.А. Ребиндером [10].

Процесс влагопередачи через ограждения зданий зависит от температуры и влажности материалов и окружающих сред, числа слоев конструкции, изменчивости условий влагообмена, а также от физических свойств материалов. Характерной особенностью влагопередачи в этом случае является периодическое изменение параметров сред на границах конструкции. Перенос влаги происходит через соприкасающиеся слои разных материалов, часто со значительно различающимися влагосодержаниями, в условиях положительных и отрицательных температур. Показатели переноса теплоты и особенно влаги в материалах при этом значительно изменяются.

Изменение во времени тепловлажностных условий на границах ограждения оказывает качественно различное действие на его температурное и влажностное поля. Инерционность процесса тепло-

передачи через ограждения при обычно длительных (в течение года) изменениях условий на их границах незначительна. Переходные температурные изменения быстро стабилизируются, а тепловой режим ограждений представляет собой чередование стационарных состояний со сравнительно небольшими градиентами температуры (квазистационарный режим). Инерционность процесса влагопередачи через ограждения относительно изменений граничных условий значительна, влагообмен в толще материалов протекает медленно, но их влажность может заметно меняться. Происходит выраженный нестационарный влажностный режим.

В связи с такой особенностью режима эксплуатации ограждений температурные условия непосредственно и существенно влияют на влагопередачу. В то же время прямое действие влагопроводности на температурное поле пренебрежимо мало, хотя теплопроводность, как свойство материалов, значительно зависит от их влажностного состояния.

Большой диапазон изменения влажности и температуры материалов и сложность граничных условий затрудняют использование для оценки влажностного режима ограждений недостаточно полных теоретических построений, применяемых для расчетов специальных режимов сушки и увлажнения (в узких диапазонах значений температуры и влажности, быстро протекающих во времени).

Для правильной характеристики влажностного режима ограждения зданий (несмотря на кажущуюся простоту) следует принять наиболее полную физическую постановку задачи. Такая постановка необходима для правильного воспроизведения действительного фактического процесса или в конечном счете для нахождения простого, но достаточно точного метода расчета влажностного состояния ограждения в возможно сложных условиях его работы (используя упрощения, возможные в связи со спецификой режима). Эту задачу можно выполнить, если за основу физико-математического описания процесса принять потенциал влажности. Для обоснования необходимости использования потенциала влажности в качестве показателя, определяющего состояние влажного материала, воспользуемся термодинамическим методом описания физических процессов, который позволяет без анализа микроявлений и частных закономерностей, многие из которых мало изучены, получить общие представления о состоянии влаги и влагообмене.

Влажный материал — тело неоднородное (рис. 1). Оно состоит из нескольких компонентов: твердой части (скелета), влаги и воз-

духа. Влага находится в нескольких фазах: кроме жидкой, парообразной и твердой дополнительно выделяются фазы поверхностных слоев влаги, свойства которых значительно отличаются от свойств внутри объемов воды, пара и льда. Компоненты и фазы влажного материала взаимодействуют между собой, между ними происходит тепло- и массообмен, формирующийся в зависимости от условий окружающей среды, поэтому элементарный объем влажного материала в ограждении нужно рассматривать как открытую гетерогенную систему. Чтобы определить термодинамику состояния гетерогенной системы, ее нужно разделить на однородные составляющие (для влажного материала это компоненты и фазы). Каждая из составляющих может быть охарактеризована массой известного химического состава, давлением, объемом, температурой и пр. Не все эти переменные являются независимыми — некоторые связаны между собой.

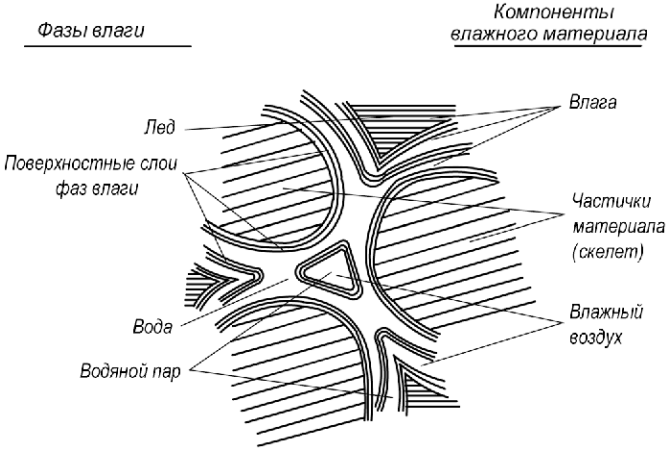

Рис. 1. Влажный материал как гетерогенная система, состоящая из отдельных компонентов и фаз

В термодинамике применяют ряд характеристических функций, определяющих состояние однородных компонентов и фаз, с помощью которых могут быть в явной форме выражены все свойства состояния (внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия и т.д.). Выбор функций определяется конкретными условиями задачи. Изменение любой из них можно определить относительно свободно выбранных независимых переменных.

Состояние влажного материала в ограждении удобно оценивать изменением его свободной энергии F. В качестве независимых переменных при определении F необходимо применять температуру T, объем V и массу m.

Изменение свободной энергии фазы в элементарном объеме влажного материала равно:

$$dF_i = \frac{\partial F_i}{\partial T_i} dT_i + \frac{\partial F_i}{\partial V_i} dV_i + \frac{\partial F_i}{\partial m_i} dm_i, \qquad (1)$$

где $\frac{\partial F_i}{\partial T_i} = -S_i$ — энтропия фазы; $\frac{\partial F_i}{\partial V_i} = -P_i$ — давление фазы; $\frac{\partial F_i}{\partial m_i} = \mu_i$ — ее химический потенциал.

Приращение свободной энергии dF_i и ее составляющих принимаем в виде удельных значений, отнесенных к единице массы. С учетом принятых обозначений уравнение состояния для dF_i запишем в виде зависимости

$$dF_i = -S_i dT_i - P_i dV_i + \mu_i dm_i, \qquad (2)$$

которая является одной из форм записи основного термодинамического уравнения Гиббса. Это уравнение показывает, как изменяется свободная энергия F_i однородной фазы при изменении T_i, V_i, m_i.

Влажный материал в ограждении находится в неравновесном состоянии, так как через него проходят тепло и влага. Неравновесные системы — предмет рассмотрения термодинамики необратимых процессов, основное положение которой состоит в утверждении возможности использования термодинамического метода для описания состояния вещества, отклонение которого от равновесного невелико. Это позволяет с помощью термодинамических зависимостей рассматривать неравновесные системы, определяя их характеристики локальным состоянием вещества (в пространстве и во времени).

Влажный материал, находящийся в неравновесном состоянии, делят на все более и более мелкие элементарные объемы, степень неоднородности и отклонение от равновесного состояния в которых постепенно уменьшаются. В то же время эти объемы должны оставаться достаточно большими, чтобы сохранять макросвойства системы в целом. Локальное описание состояния вещества связа-

но с условным дроблением в пространстве и во времени и выделением небольших его объемов в течение некоторых отрезков времени, в которых состояние вещества неотличимо от равновесного, а размеры достаточны для макроанализа. Отклонение от равновесного состояния оказывается незначительным, если изменения температуры и состава в пределах выделенных объемов меньше определенных значений этих величин. Статистический подход к макроанализу элементарных объемов возможен, если их размеры больше свободного пробега молекул.

При выполнении вышеуказанных условий термодинамическое состояние выделенных элементарных объемов вещества зависит только от выбранных независимых переменных, а не от градиентов их изменения, которые всегда имеются при неравновесном состоянии. Локальное состояние вещества может быть определено уравнением (2). В наружных ограждениях процесс влагопередачи протекает медленно и отклонение влажностного состояния материала обычно невелико от равновесного, поэтому при решении задач строительной теплофизики пользуются теоретическими построениями термодинамики необратимых процессов [9].

Таким образом, для локального определения свойств фаз воды и компонентов материала в ограждении может быть использовано уравнение вида (2).

Для скелета материала (с) объемом $V_с$, состав и масса $m_с$ которого остаются неизменными, уравнение (2) имеет вид:

$$dF_с = -S_с dT_с. \tag{3}$$

Свободную энергию сухой части воздуха можно определить аналогичным уравнением.

Для парообразного (п) состояния влаги, так же как для льда (л), характерно отсутствие примесей в фазе, и изменение свободной энергии составит:

$$dF_п = -S_п dT_п - P_п dV_п + \mu_п dm_п, \tag{4}$$

$$dF_л = -S_л dT_л - P_л dV_л + \mu_л dm_л. \tag{5}$$

В жидкой фазе влаги находятся растворенные примеси j, поэтому

$$dF_ж = -S_ж dT_ж - P_ж dV_ж + (\mu_ж + \mu_{ж,j}) dm_ж, \tag{6}$$

где $\mu_{ж,j}$ — составляющая химического потенциала жидкой фазы влаги, вызванная наличием растворенных примесей j.

Влага в материале может находиться под заметным действием гравитационных, электрических и других силовых полей. Дополнительное изменение удельной свободной энергии фазы в пределах элементарного объема материала под влиянием этих силовых полей может быть определено в виде суммы произведений потенциалов соответствующих силовых полей Θ_m в рассматриваемой системе на приращение массы dm_i, т.е. $\sum\Theta_m dm_i$.

При расчетах влагопереноса в ограждениях важно учитывать действие на жидкую фазу влаги гравитационного поля с потенциалом $\Theta_Г$ и вводить дополнительное слагаемое в равенство (6).

$$dF_ж = -S_ж dT_ж - P_ж dV_ж + (\mu_ж + \mu_{ж,j})dm_ж + \Theta_Г dm_ж. \qquad (7)$$

Плотность жидкой фазы влаги $\rho_ж$ можно считать практически неизменной, поэтому второй член правой части уравнения (7) можно преобразовать, умножив и разделив на $\rho_ж$, тогда:

$$dF_ж = -S_ж dT_ж + \left(-\frac{P_ж}{\rho_ж} + \mu_ж + \sum\mu_{ж,j} + \Theta_Г\right)dm_ж. \qquad (8)$$

Таким образом, состояние влажного материала как открытой гетерогенной системы определяется системой термодинамических уравнений, каждое из которых характеризует однородную ее часть (компонент или фазу).

В термодинамике приняты понятия интенсивности и экстенсивности. Характеристики интенсивности не зависят от массы или числа частиц фазы, они являются термодинамическими потенциалами фазы (T, P, μ, Θ и т.д.). Ими обусловливаются равновесные свойства и возможность, направление и предел протекания переходных процессов переноса энергии и вещества. С их помощью можно определить возможность переноса энергии или массы в системе или от одной ее фазы к другой. Факторы экстенсивности являются характеристиками емкостных свойств (F, S, V, m). Они пропорциональны массе, объему, числу частиц вещества фазы.

Отдельные элементарные объемы системы и ее составляющие находятся во взаимодействии. Обмен теплотой и массой между ними происходит до выравнивания соответствующих термодинамических потенциалов в результате изменения определенных емкостных параметров. Если разности потенциалов отдельных частей поддерживаются или определенным образом изменяются, например, из-за внешних или внутренних воздействий, то на границах

системы будет происходить обмен энергией и веществом, а в отдельных элементарных объемах внутри системы будут изменяться потенциалы и емкостные характеристики.

Для каждой фазы системы справедливо уравнение вида (8), из которого можно сделать вывод о том, что перенос энергии и вещества фазы происходит от более высокого уровня свободной энергии к более низкому. Перенос теплоты, происходящий от более высокой температуры к более низкой, приводит к изменению энтропийной ($S_ж dT_ж$) составляющей энергии. Из уравнения (8) следует, что изменение массы фазы связано с величиной, взятой в скобки, во втором слагаемом уравнения. Эта величина по физическому смыслу является полным термо-динамическим потенциалом фазы $\Theta_ж$ (в данном уравнении жидкой фазы влаги):

$$\Theta_ж = -\frac{P_ж}{\rho_ж} + \mu_ж + \sum \mu_{ж,j} + \Theta_Г. \qquad (9)$$

Из (8) также следует, что перенос массы жидкой фазы происходит от области с более высоким $\Theta_ж$ к области с более низким потенциалом.

Между фазами во влажном материале происходит обмен энергией и веществом. Если принять во внимание сравнительно медленное протекание процессов тепло- и массообмена в ограждениях, то систему уравнений состояния влажного материала можно упростить. В любой точке материала для жидкой фазы влаги, влажного воздуха, скелета материала можно принять одну общую температуру.

Внутри пор материала достигается термодинамическое равновесие между фазами влаги: наряду с равенством температуры устанавливается равенство потенциалов фаз влаги. Потенциалы жидкой фазы влаги, парообразной, льда, а также всех граничных слоев влаги в некоторой точке влажного материала в каждый момент времени фактически равны. Общий для всех фаз влаги потенциал определим как потенциал влажности Θ:

$$\Theta = \Theta_ж = \Theta_п = \Theta_л. \qquad (10)$$

Отметим, что принятое положение о равенстве потенциалов между фазами влаги в материалах принято во всех теориях влагопередачи [7, 8, 11, 12].

Каждая фаза имеет свои внутреннюю энергию и энтальпию. Энергия и энтальпия всей массы влаги будут равны их сумме для

фаз. В результате вместо ряда уравнений для отдельных фаз влаги может быть написано одно уравнение для влаги:

$$dF_{\text{вл}} = -S_{\text{вл}}dT + \Theta dm, \tag{11}$$

где $dF_{\text{вл}}$ — свободная энергия; $S_{\text{вл}}$ — энтропия; m — масса влаги.

Перенос массы влаги происходит от более высокого потенциала влажности к более низкому, поэтому разность потенциалов Θ определяет возможность, направление переноса (независимо от фазового состояния) и предел (влажностное равновесие) переходного процесса влагообмена. Изменение свободной энергии всей системы (влажного материала) dF будет равно сумме изменений свободной энергии каждой составляющей (компоненты и фазы):

$$dF = -SdT + \ dm, \tag{12}$$

где S — энтропия влажного материала (всей системы).

Такое преобразование возможно в силу отмеченного ранее свойства аддитивности емкостных параметров, к которым относятся свободная энергия, энтропия и масса. Последняя запись (12) уравнения состояния для влажного материала удобна тем, что в ней выделено определяющее влагообмен самостоятельное слагаемое (второе слагаемое).

Потенциал влажности Θ (10) зависит от давления P, химического потенциала μ и других параметров. Величину μ нельзя измерить непосредственно в опыте, возникают значительные сложности и при определении давления в отдельных фазах влаги. Поэтому Θ нельзя определить непосредственным измерением параметров интенсивности в эксперименте. Это обстоятельство существенно с точки зрения практического применения рассмотренных термодинамических построений. Они представляют интерес и важны как теоретическая основа для качественной оценки состояния влаги в материале.

Для измерения потенциала влажности необходима специальная шкала. Она может быть правильно установлена только при учете рассмотренной теории состояния влажного материала.

Для решения задачи о состоянии и переносе влаги удобно и возможно систему уравнений состояния упростить. Влажный материал можно считать двухкомпонентной однофазной системой, состоящей из твердого вещества и влаги (без разделения ее на фазы). Такую упрощенную модель определяет характеристическое уравнение состояния влажного тела (12).

Потенциал влажности в процессе переноса влаги играет такую же роль, как температура в процессе переноса теплоты. Эта аналогия позволяет принять для введения шкалы потенциала влажности хорошо проработанную в термодинамике методику введения шкалы температуры.

Используя последовательность логических построений для определения температуры и ее шкалы, примем постулат о влажностном равновесии: *если два тела находятся во влажностном равновесии с третьим, то они находятся во влажностном равновесии между собой*. Из этого постулата, подтвержденного многочисленными опытами, следует, что условие влажностного равновесия тел заключается в равенстве некоторой функции состояния влаги в этих телах. Такой функцией, однозначно определяющей состояние влаги во влажном материале, как это видно из (12), может быть только потенциал влажности Θ.

Из постулата о влажностном равновесии следует, что в качестве измерителя потенциала влажности можно выбрать любое влажное тело. Такая же свобода допустима в выборе показателей его численных значений для создания шкалы Θ. Измеренный по такой шкале потенциал влажности будет экспериментальным в отличие от абсолютного, который определяют с помощью термодинамических функций. Так же как практические шкалы измерения температур (Цельсия, Фаренгейта, Реомюра) отличаются от теоретической (термодинамической) шкалы, так и экспериментальное значение потенциала влажности отличается от теоретического значения, полученного в термодинамическом уравнении.

Изменение потенциала влажности зависит от изменения степени влажности, вида материала, давления в фазах влаги, температуры, потенциалов гравитационного, осмотического и других силовых полей. Поэтому, пользуясь правом произвольного выбора шкалы, Θ можно измерять в шкале влажности, давления, потенциала гравитационного поля и с помощью других показателей. Однако необходимым условием такого выбора является возможность исключения влияния других факторов, от которых зависит величина потенциала влажности.

Существуют теоретические построения процесса влагообмена, в которых за основу приняты различные шкалы потенциала состояния влаги: упругость водяных паров [12], капиллярное давление [8], влагосодержание [7], гравитационный потенциал [14], потенциал капиллярного испарения [15] и др. Однако принятая методи-

ка измерения с помощью этих шкал является недостаточной, так как не исключает влияния прочих факторов.

Из всех показателей, с помощью которых можно определить Θ, для построения численной шкалы наиболее удобно равновесное влагосодержание. Оно и принято в качестве измерителя потенциала влажности. Чтобы исключить влияние вида материала, измерения надо проводить с помощью одного эталонного материала. Влияние температуры можно исключить, приведя результаты измерений при произвольной температуре к результатам, полученным при температуре, принятой за эталонную. При определении равновесной влажности в эксперименте необходимо исключить также действие гравитационного, осмотического и других силовых полей.

Считается наиболее удобным измерять потенциал влажности влажного тела влагосодержанием фильтровальной бумаги, находящейся с ним в состоянии влажностного равновесия. За эталонную принимают температуру +20 °С. Потенциал влажности измеряют в градусах влажности (°В). Равновесную весовую влажность фильтровальной бумаги, соответствующую максимальной гигроскопической[1] влажности при эталонной температуре, принимают за 100 °В. Абсолютно сухому состоянию тела соответствует 0 °В. Экспериментальную шкалу разбивают на градусы влажности равномерно. За один градус влажности принимают изменение равновесной весовой влажности[2] фильтровальной бумаги на 1/100 значения ее максимальной гигроскопической влажности при эталонной температуре.

Установлена зависимость равновесной влажности фильтровальной бумаги от Θ при разных температурах (рис. 2). Этой зависимостью пользуются для приведения результатов измерения в неизотермических условиях к единой шкале равновесной влажности при эталонной температуре (методика построения изложена ниже).

На рис. 2 приведен график зависимости между потенциалом влажности Θ, весовой влажностью фильтровальной бумаги $U_{ф.б}$ и температурой t.

---

[1] В.Н. Богословский использует термин «гигроскопическая» для обозначения сорбционной влажности. Под максимальной гигроскопической влажностью имеется в виду сорбционная влажность фильтровальной бумаги при относительной влажности воздуха 97 %.

[2] Термином «весовая влажность» здесь обозначается «влажность по массе». Этот термин сохранен в книге, поскольку он использован в предыдущих работах В.Н. Богословского [1, 2].

Конец ознакомительного фрагмента.
Для приобретения книги перейдите на сайт магазина «Электронный универс»:
e-Univers.ru.