МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ

В.Н. Богословский

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К НАРУЖНЫМ ОГРАЖДЕНИЯМ ОБОЛОЧКИ ЗДАНИЙ

Под редакцией В.Г. Гагарина

Москва 2013

УДК 699.8:621.18
ББК 38.637
Б 74

Рецензенты:
кандидат технических наук, доцент *А.Г. Рымаров*,
ФГБОУ ВПО «МГСУ»;
В.К. Васильев,
начальник отдела инженерных систем ЗАО «Промстройпроект»

Монография рекомендована к публикации
научно-техническим советом МГСУ

Богословский, В.Н.

Б 74 Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки зданий : монография / В.Н. Богословский ; под ред. В.Г. Гагарина ; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». — Москва : МГСУ, 2013. — 112 с. (Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ).

ISBN 978-5-7264-0766-1

Представлен труд последних лет жизни академика РААСН В.Н. Богословского, важный для понимания влажностных процессов, происходящих в ограждающих конструкциях зданий, эксплуатирующихся в российском климате.

Включен раздел об истории развития учения о потенциале влажности, написанный научным редактором издания, в котором прослеживается долгая история развития потенциала влажности.

Приложение состоит из биографии и воспоминаний о В.Н. Богословском его учеников и коллег.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов строительных вузов, специализирующихся в области теплофизики наружных ограждающих конструкций.

УДК 699.8:621.18
ББК 38.637

ISBN 978-5-7264-0766-1

© ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2013

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

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.

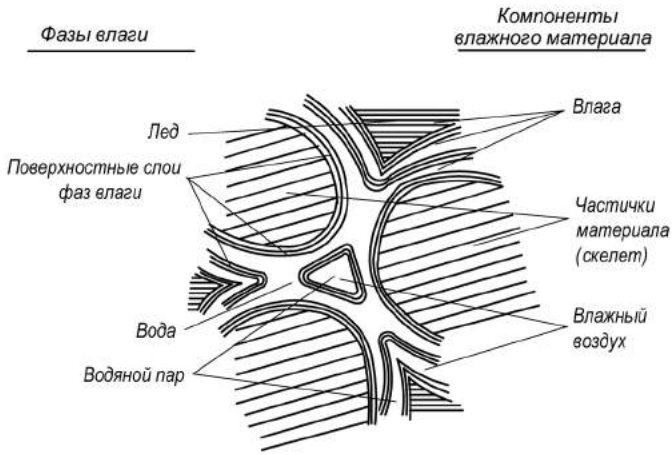


Рис. 1. Влажный материал как гетерогенная система, состоящая из отдельных компонентов и фаз

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:

$$dF_{вл} = -S_{вл}dT + \Theta dm, \qquad (11)$$

где $dF_{вл}$ — свободная энергия; $S_{вл}$ — 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):

$$dF = -SdT + dm, \qquad (12)$$

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].

Потенциал влажности произвольного материала при любом влагосодержании и температуре устанавливают по равновесной с ним влажности фильтровальной бумаги с использованием шкалы, показанной на рис. 2.

Все положения о потенциале влажности справедливы и для области отрицательных температур. В мерзлых материалах часть влаги превращается в лед, но между фазами воды сохраняется, как было указано, равенство потенциалов влажности.

Вопрос выбора эталонного материала еще требует своего окончательного решения. Фильтровальная бумага приемлема для этой цели по многим своим свойствам. Она обладает «растянутыми» и хорошо выраженными влажностными свойствами во всем диапазоне влагосодержания от абсолютно сухого состояния до состояния полного насыщения влагой. Ее легко обрабатывать и использовать в эксперименте, удобно набирать пакеты различных размеров из отдельных листочков. Но она не долговечна и легко, особенно при высоких влажностях, разрушается. Необходимо получить специальный материал с заданными наперед влажностными свойствами, близкий к идеальному эталонному, разработанному по специальной компьютерной программе.

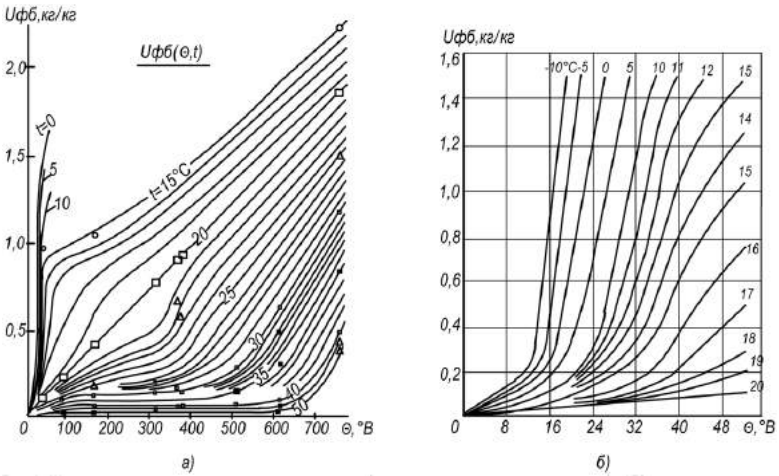


Рис. 2. Шкала потенциала влажности, зависимость:
а — между потенциалом влажности (Θ, °В) и весовой влажностью фильтровальной бумаги $\left(U_{\text{ф.б.}}, {}^{\text{кг}}/_{\text{кг}}\right)$; *б* — то же, в диапазоне Θ от 0 до 50 °В, включая область отрицательных температур

Процесс нестационарной влагопередачи в многослойных конструкциях при неизотермических условиях в широком диапазоне (до и сверх гигроскопической) влажности можно описать, используя понятие потенциал влажности Θ.

Процесс влагообмена в толще материала подчиняется двум закономерностям: поглощения (ассимиляции) влаги и влагопроводности. Поглощение влаги связано со свойством влагоемкости материала, η. Величина η определяет изменение влагосодержания материала U с изменением его потенциала влажности и зависит от Θ и температуры. Она равна частной производной влагосодержания по потенциалу влажности (см. рис. 2) — тангенсу угла наклона касательной к изотерме зависимости влажности от потенциала Θ:

$$\eta = \frac{\partial U}{\partial \Theta}. \tag{13}$$

Удельная влагоемкость η имеет размерность кг/(кг · °В).

Свойство проводимости влаги материалом обусловливает перенос влаги. По аналогии с теплопроводностью и на основе экспериментальных наблюдений принимаем, что поток влаги i, кг/(м^2 · ч), пропорционален градиенту потенциала влажности ∇Θ, °В/м:

$$i = -\kappa \nabla \Theta, \tag{14}$$

где κ — коэффициент влагопроводности, кг/(м · ч · °В).

Принимая уравнение (14), используем важное положение термодинамики необратимых процессов, устанавливающее выбор потоков и вызывающих их сил. Имеется определенная свобода такого выбора [9], так как приращение свободной энергии элементарного объема может быть различными путями расчленено на сумму сопряженных потоков и сил. Поток пропорционален силе, которая определяется градиентом термодинамического потенциала. В рассматриваемом случае выбор потока обусловлен задачей расчета переноса влаги. Силой, сопряженной с потоком влаги, является градиент потенциала влажности ∇Θ, так как только этот термодинамический потенциал в уравнении состояния влажного материала (12) непосредственно связан с изменением массы влаги. Процесс влагопроводности в толще материала определяют уравнением поля потенциала влажности. Оно может быть получено на основе закона сохранения массы вещества из рассмотрения баланса влаги в элементарном объеме материала. Для одномерного поля имеем:

$$\eta(\Theta, t)\rho_o \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\kappa(\Theta, t)\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right], \qquad (15)$$

где ρ_o — плотность абсолютно сухого материала, кг/м^3.

Изменение потенциала влажности зависит от температуры. В свою очередь при перемещении влаги, связанном с переносом теплоты, изменяется температура. Процессы тепло- и влагообмена в толще материала взаимосвязаны, поэтому в общем случае для расчета влажностного и теплового режимов требуется рассмотрение системы из уравнения теплопроводности, осложненного наличием дополнительных источников теплоты, и уравнения влагопроводности. Такой расчет оказывается весьма сложным.

Учитывая отмеченную выше специфику тепловлажностного режима ограждений, его расчет может быть выполнен проще. Температурное поле рассчитывают отдельно, постадийно, учитывая изменения влажностного состояния материалов ограждения только при выборе тепловых характеристик процесса. Влагопередачу с учетом влияния температурного поля рассчитывают по (15).

Уравнение (15) удобно для расчетов влажностного режима ограждений. В нем отсутствует член, учитывающий перенос влаги только под действием температуры, как это имеет место в уравнении теории термовлагопроводности [7]. Влияние температурного поля на процесс влагопроводности учитывается в значениях потенциала влажности и значениях характеристик η и κ.

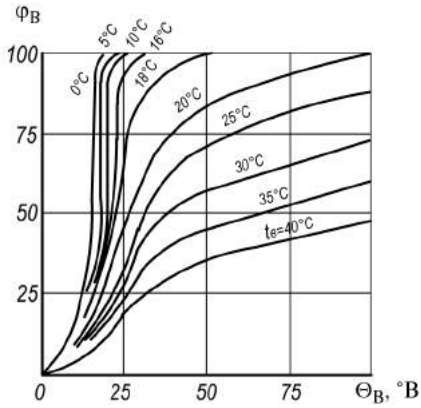


Рис. 3. Зависимость между относительной влажностью воздуха $\varphi_В$, его потенциалом влажности $\Theta_В$ и температурой $t_В$

Граничные условия для расчета влагопередачи по (15) следующие. На поверхности ограждения происходит влагообмен с воздухом. Для определения этого граничного условия необходимо знать потенциал влажности воздуха $\Theta_В$. Зависимость $\Theta_В$ от температуры $t_В$ и относительной влажности $\varphi_В$ воздуха (рис. 3) аналогична такой же зависимости для других влажных тел. Она может быть получена графически перестроением изотерм сорбции фильтровальной бумаги, которые дают зависимость $U_{ф.б}(\varphi_В, t)$ и шкалы $\Theta(U_{ф.б}, t)$, приведенной на рис. 2.

Граничное условие влагообмена поверхности ограждения с воздухом (условие III рода) имеет вид

$$\beta_\Theta\left(\Theta|_{пов} - \Theta_В\right) = -\kappa\frac{\partial\Theta}{\partial x}|_{пов}, \qquad (16)$$

где $\Theta|_{пов}$ и $\frac{\partial\Theta}{\partial x}|_{пов}$ — соответственно, потенциал влажности и градиент потенциала влажности в материале на поверхности конструкции; $\Theta_В$ — потенциал влажности воздуха; β_Θ — коэффициент влагообмена, кг/(м^2 · ч · °В).

Коэффициент β_Θ зависит от потенциала влажности, температуры поверхности ограждения и воздуха, а также от подвижности последнего. Для условий естественной конвекции приближенно

$$\beta_\Theta \approx 2{,}3 \cdot 10^{-3}\Delta t^{1/3}\Delta\Theta^{2/5}, \qquad (17)$$

где Δt и $\Delta\Theta$ — соответственно, разность температуры и разность потенциала влажности воздуха и поверхности ограждения.

Формула (17) получена на основе экспериментальных данных влагообмена на вертикальной поверхности при конденсации водяных паров с использованием приближенной зависимости между разностью упругости водяных паров и разностью потенциалов влажности.

На поверхности может быть задан поток влаги $i|_{пов}$, тогда нужно использовать граничное условие II рода в виде:

$$i|_{пов} = \kappa\nabla\Theta|_{пов}, \qquad (18)$$

или изменение потенциала влажности на поверхности $\Theta(z)$ (условие I рода) в виде:

$$\Theta(z) = \Theta|_{пов}. \qquad (19)$$

В многослойных ограждениях на стыке слоев различных материалов потенциалы влажности материалов равны. Это важное следствие теории потенциала влажности. Кроме того, на стыке слоев равны потоки влаги, поэтому граничное условие на стыке слоев при соприкосновении различных материалов (условие IV рода) имеет вид:

$$\begin{cases} \Theta_1 |_{\text{пов}} = \Theta_2 |_{\text{пов}}; \\ \kappa_1 \dfrac{\partial \Theta_1}{\partial x} |_{\text{пов}} = \kappa_2 \dfrac{\partial \Theta_2}{\partial x} |_{\text{пов}} \end{cases} \tag{20}$$

Постановка задачи нестационарной влагопередачи через ограждение, основанная на потенциале влажности, имеет ряд достоинств. В отличие от других теорий, она может быть использована для расчета влажностного режима многослойных конструкций в неизотермических условиях при любой влажности и температуре материалов и окружающих сред[1].

Для многих строительных материалов нет характеристик состояния влаги и влагопроводности в шкале потенциала влажности, что затрудняет практические расчеты. В лабораториях МИСИ, НИИ строительной физики и в других институтах [3, 5, 7, 12, 15] для некоторых материалов такие данные получены. Методика их определения, изложенная ниже, достаточно проста и может широко применяться.

3. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ВЛАГОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ

Шкала потенциала влажности

Экспериментальная шкала позволяет измерить потенциал влажности и оценить общим показателем влажностное состояние произвольного материала в неизотермических условиях. В опытах определяют равновесную с искомым материалом или средой влажность фильтровальной бумаги при разных температурах. В экспериментальной шкале, как было сказано, потенциал влажности измеряют равновесным влагосодержанием эталонного материала (фильтровальной бумаги) при эталонной температуре (20 °С). Для перехода

[1] Приведенное предложение не совсем точное. Известны и другие методы расчета влажностного режима ограждающих конструкций при тех же условиях.

от измеренного влагосодержания фильтровальной бумаги в неизотермических условиях к потенциалу влажности пользуются шкалой (см. рис. 2), которая построена на основе результатов экспериментов.

Построению экспериментальной шкалы потенциала влажности предшествовали опыты, которые состояли в следующем. Влагоизолированную колонку, собранную из пачек листов фильтровальной бумаги определенного влагосодержания, помещали между термостатами с разной температурой. Под влиянием перепада температуры в колонке происходило перераспределение влаги. Со временем сначала температура, а затем и влагосодержание стабилизировались. Результаты трех опытов в виде установившихся кривых распределения влажности и температуры по длине колонки *x* приведены на рис. 4.

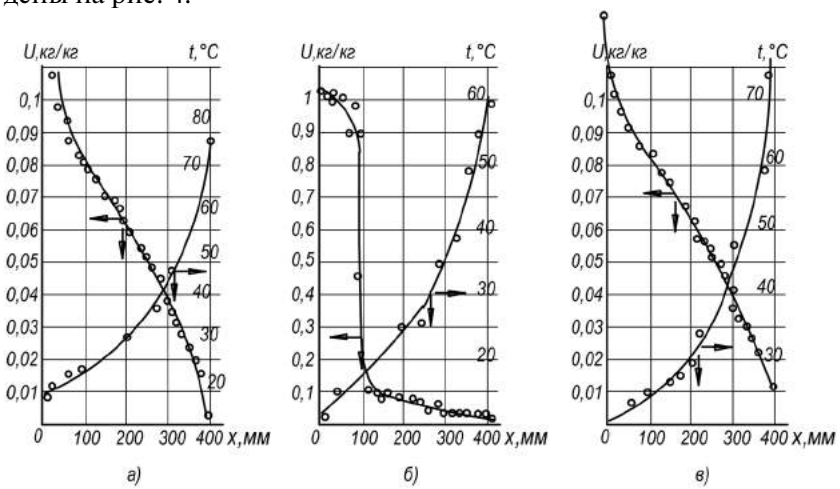


Рис. 4. Распределение влагосодержания *U* и температуры *t* по длине колонки *x* в опытах неизотермического влажностного равновесия колонок из фильтровальной бумаги с различным начальным влагосодержанием U_0, но при постоянном равновесном Θ около 40 °В:
а — Θ_ξ = 38,2 °В; U_0 = 0,0609 кг/кг; *б* — то же, 40,5 °В и 0,269 кг/кг; *в* — то же, 42 °В и 0,0615 кг/кг

Распределение влаги, как видно из рисунка, противоположно распределению температуры: к торцу колонки с более низкой температурой влажность бумаги повышается. Распределение влаги, соответствующее неизотермическому влажностному равновесию в колонке, определяли взвешиванием отдельных пачек бумаги. Потенциал влажности в установившихся условиях влажностного рав-

новесия по длине колонки одинаковый: $\Theta_x = \Theta = \text{const}$, так как перемещение влаги отсутствует и потоки влаги во всех сечениях равны нулю. Θ соответствует влагосодержанию бумаги U_1 в сечении колонки, где температура эталонная (20 °С):

$$\Theta = \frac{U_1}{U_{20^\circ}^{\text{мг}}} 100, \tag{21}$$

где $U_{20^\circ}^{\text{мг}}$ — максимальная гигроскопическая влажность фильтровальной бумаги при $t = 20$ °С.

В других сечениях колонки этой же величине Θ соответствуют иные значения температуры и влажности бумаги.

Один опыт дает множество сочетаний равновесной влажности и температуры, соответствующих одному значению потенциала влажности. Изменяя начальную влажность бумаги или температуры на торцах колонки, можно получить равновесные распределения влажности при разных температурах, соответствующие разным значениям потенциала влажности. В результате серии опытов установлена связь между равновесной влажностью фильтровальной бумаги $U_{\text{ф.б}}$ и потенциалом влажности при разных температурах $U_{\text{ф.б}}(\Theta, t)$ (см. рис. 2). С помощью шкалы потенциала влажности можно найти значения Θ, соответствующие любому влагосодержанию и температуре произвольного материала. Для этого необходимо определить равновесную с ним влажность фильтровальной бумаги и температуру.

Относительный потенциал влажности

Из-за сложности зависимости $U_{\text{ф.б}}(\Theta, t)$ применение шкалы потенциала влажности затруднительно. Чтобы выявить возможность упростить эту связь, воспользуемся аналогией между потенциалом влажности и упругостью водяных паров. В теории диффузии пара в сорбирующей среде [12] в качестве эталонного тела используется воздух, за потенциал состояния влаги принимается его равновесная упругость водяных паров (e). Зависимость между влагосодержанием материала, упругостью водяных паров и температурой $U(e, t)$ столь же сложна, как и зависимость $U(\Theta, t)$. Она значительно упрощается при использовании показателя относительной влажности воздуха $\varphi_{\text{В}}$. Кривые сорбции и десорбции, которые обычно строят относительно $\varphi_{\text{В}}$, для многих строительных материалов незначи-

тельно зависят от температуры, что позволяет пользоваться в расчетах одной кривой.

По аналогии с использованием для упрощения зависимости $U(e, t)$ относительной влажности воздуха $\varphi_В$, в теорию потенциала влажности введено понятие — относительный потенциал влажности φ_Θ. Для выбора численных значений шкалы φ_Θ так же, как и шкалы $\varphi_В$, физических ограничений нет, поэтому необходимо учесть только требования удобства ее практического использования. Прежде всего примем, что между φ_Θ и влажностью фильтровальной бумаги, как эталонного материала, должна быть однозначная зависимость $U_{ф.б}(\varphi_\Theta)$, не связанная с температурой и другими параметрами. Она не обязательно должна иметь простое аналитическое выражение и может быть определена графически.

Показатель $\varphi_В$ широко применяется в практике для характеристики влажности наружного и внутреннего воздуха, гигроскопической влажности материалов (с помощью изотерм сорбции-десорбции) и др. Поэтому условимся и примем, что обобщающий показатель φ_Θ в диапазоне сорбционной влажности материалов равен $\varphi_В$. В пределах $\varphi_\Theta = \varphi_В < 1$ для построения $U_{ф.б}(\varphi_\Theta)$ примем изотерму сорбции фильтровальной бумаги при эталонной температуре. Вне этого предела примем, что φ_Θ от $U_{ф.б}$ изменяется по прямой, верхний предел которой — максимальное насыщение фильтровальной бумаги водой (около 2,53 кг/кг) соответствует $\varphi_\Theta = 3$.

Построенная таким образом зависимость между влажностью фильтровальной бумаги $U_{ф.б}$ и относительным потенциалом влажности φ_Θ, $\varphi_\Theta(U_{ф.б})$ графически изображена на рис. 5. Она может быть определена общей математической записью

$$\varphi_\Theta = \frac{f_1(\Theta)}{f_2(\Theta_{МС})}, \qquad (22)$$

которая качественно отражает физический смысл φ_Θ — относительного потенциала влажности ($\Theta_{МС}$ — потенциал, соответствующий максимальной сорбционной влажности). Одно из предложений по количественной расшифровке этого выражения дано в статье [5]. Исходя из сделанного в этой статье анализа приняты значения реперных точек φ_Θ, определяющих кривую зависимости $U_{ф.б}(\varphi_\Theta)$, показанную на рис. 5. Шкала φ_Θ позволяет распространить

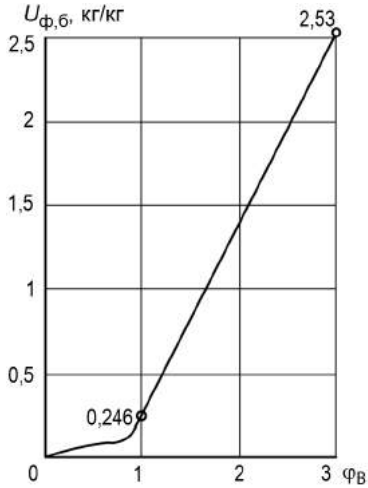


Рис. 5. Кривая зависимости равновесной влажности фильтровальной бумаги $U_{ф.б}$ от относительного потенциала влажности φ_Θ (шкала относительного потенциала влажности)

зависимость, подобную изотерме сорбции, на сверхгигроскопическую влажность материалов.

На рис. 6 как пример приведена зависимость $U_{ВГ}(\Theta, t)$ для виброгазосиликата. Как показывают опыты, равновесные влажности различных материалов, в том числе влажности, равновесные с влажностью фильтровальной бумаги, практически не зависят от температуры. На рис. 7 показаны данные, те же, что и на рис. 6, но в виде зависимости $U(U_{ф.б})$. Это обстоятельство значительно облегчает получение необходимых экспериментальных данных, так как для каждого материала нужно определить только одну кривую равновесных влажностей с влажностью фильтроваль-

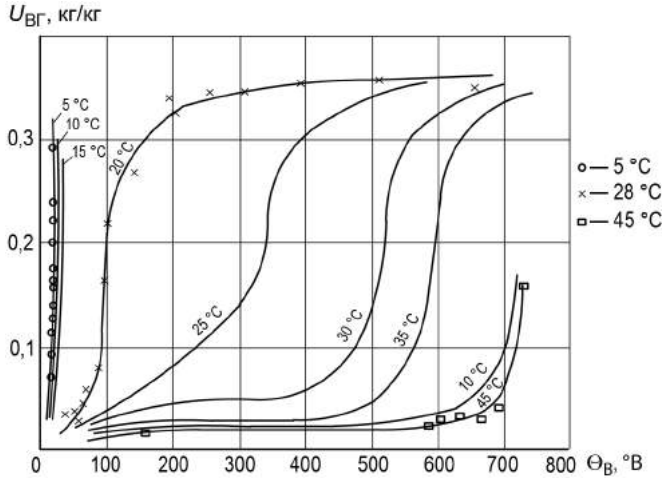


Рис. 6. Изотермы равновесных влажностей виброгазосиликата $U_{ВГ}$ относительно потенциала влажности

ной бумаги $U(U_{ф.б})$, независимо от температуры. При наличии $U(U_{ф.б})$, а также $U_{ф.б}(\Theta, t)$ и $U_{ф.б}(\varphi_\Theta)$, этих сведений достаточно для определения потенциала и относительного потенциала влажности, соответствующих различным влажностям и температурам материала.

Относительный потенциал влажности удобен для оценки тепловлажностного состояния материалов и окружающих их сред. Подобно тому, как относительная влажность $\varphi_В$ характеризует только влажностное равновесное состояние материала (по изотермам сорбции-десорбции) и воздуха, а диффузию влаги в сорбирующей среде определяет градиент парциального давления водяных паров, так и φ_Θ определяет только влажностное состояние материала и среды, а влагопроводность связана с градиентом потенциала влажности.

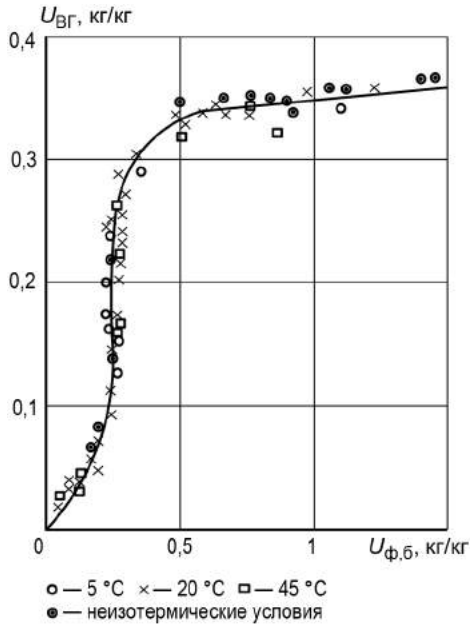


Рис. 7. Равновесные влажности виброгазосиликата $U_{ВГ}$ относительно весовой влажности фильтровальной бумаги $U_{ф.б}$ при разных температурах (с учетом рис. 5 это связь $U_{ВГ}$ и φ_Θ)

Равновесные влагосодержания на стыке различных материалов в конструкции при разных температурах практически определяются только значениями относительного потенциала влажности (см. табл. 1).

Таблица 1

Равновесные весовые влагосодержания $u \cdot 10^{-2}$ (кг/кг) разнообразных строительных материалов, соответствующие различным значениям относительного потенциала влажности φ_{Θ}

Материал	ρ, кг/м^3	Значения $u \cdot 10^{-2}$ (кг/кг) при φ_{Θ}, равном														
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
Фильтровальная бумага марки Ф-1	380	5,0	8,0	10	12	24,6	45	72	92	120	138	160	182	212	230	253
Пенопласт полистирольный	30	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Пенопласт ФРП-1	50	3	4	5	8	19	44	73	105	150	196	242	296	350	402	450
Газосиликат	350	1	1,4	1,9	2,8	15	42	65	88	110	132	154	176	198	220	243
»»	390	1,2	1,8	2,4	3,7	19	47	68	91	103	121	138	156	173	190	208
Пенобетон	700	2,5	4,3	4,9	7,4	15	34	41	—	—	—	—	—	—	—	—
Газозолосиликат	700	2,6	5,0	6,4	11	23	48	58	65	72	—	—	—	—	—	—
Газобетон	700	2,3	4,5	6	8	11	12	15	16	21	24	43	—	—	—	—
Фибролит	800	5,6	7,8	10	17	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Пенозолобетон	900	4	6	8	13	29	45	54	—	—	—	—	—	—	—	—
Поризованный керамзитобетон	900	1,4	2,4	2,6	3,9	6,3	13	17	20,7	23,4	26	—	—	—	—	—
Керамзитоперлитобетон	1000	2,4	3,9	4,5	6	13	21	25	28	31	—	—	—	—	—	—
Шунгезитобетон	1150	1,7	2	2,2	2,9	4,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Керамзитобетон	1150	1,8	2,6	3,5	5,3	10	17	21	24	28	31	35	38	41	45	49
Шлакобетон	1650	1,8	2,5	2,7	3,3	7	7,8	8,2	8,4	8,5	8,9	9,3	—	—	—	—
Раствор известковый	1650	0,3	0,4	0,6	0,9	2,2	5	6,8	9	10	13	16	18	20	22	24
»»	1700	0,2	0,4	0,8	1,1	1,7	8,5	11	13	14	14	14	15	—	—	—
Раствор цементо-известковый 1:1:3	1700	0,8	1,2	1,6	2,4	4	6	7,8	9,7	11	13	15	17	18,6	20	22
Кирпич красный	1800	0,3	0,5	0,7	0,9	1,3	2,5	7,5	12	14	—	—	—	—	—	—
Раствор цементный 1:2	1980	1,1	1,5	2,1	3,1	4,4	7	8	9,1	10	11	13	14	15	16	18
Бетон	2050	0,5	0,7	0,9	1,4	2,2	3	4,2	5	5,7	6,4	7	8	8,6	9	10

В табл. 1 приведены собранные по различным источникам равновесные влажности на стыке различных материалов при одинаковых значениях относительного потенциала влажности (граничное условие IV рода).

Характеристики состояния и переноса влаги в строительных материалах

Для расчета нестационарной влагопередачи необходимо иметь характеристики состояния и переноса влаги материалов. Эти данные должны быть получены лабораторными испытаниями.

Проведение опытов на различных образцах разными методами снижает достоверность результатов. Разброс опытных значений влажностных характеристик материалов по сравнению с другими физическими показателями, как известно, оказывается особенно большим. В МИСИ был разработан комплексный метод определения влажностных характеристик строительных материалов, названный методом разрезной колонки. Позднее он был усовершенствован [2] и распространен на испытания при неизотермических условиях. Методом разрезной неизотермической колонки (рис. 8)

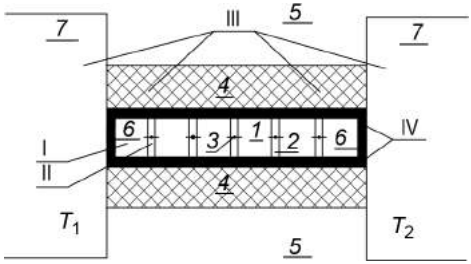
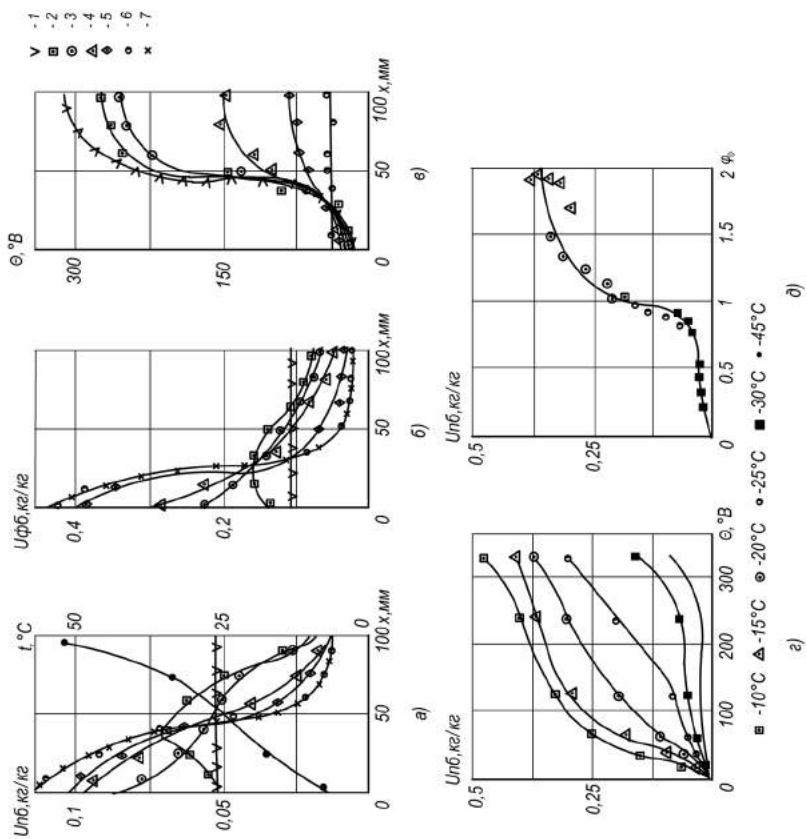


Рис. 8. Схема экспериментальной установки метода разрезной неизотермической колонки:
I — колонка испытуемого материала, разрезанная на пластины; *II* — пачки листов фильтровальной бумаги с контрольными термопарами между пластинами материала; *III* — торцы колонки в непосредственном контакте со стенками термостатов с разными температурами T_1 и T_2; *IV* — влаго- и теплоизолированная обойма (разборная), в которой уложена разрезная колонка испытуемого материала; *1* — пластины испытуемого материала; *2* — пачки листов фильтровальной бумаги; *3* — контрольные термопары; *4* — влагоизоляция по всей поверхности разрезной колонки; *5* — теплоизоляция только по боковым поверхностям разрезной колонки; *6* — торцы колонки (влагоизолированные) в контакте со стенками термостатов; *7* — термостаты, между которыми устанавливаются обоймы с разрезанными колонками, с температурами T_1 = const, T_2 = const


Uпб,кг/кг
t,°C
0,1
0,05
50
25
0
50
100 x,мм
а)
Uфб,кг/кг
0,4
0,2
б)
θ,°B
300
150
в)
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
Uпб,кг/кг
0,5
0,25
0
100
200
300
θ,°B
г)
-10°C
-15°C
-20°C
-25°C
-30°C
-45°C
0,5
1
1.5
2 φ%
д)

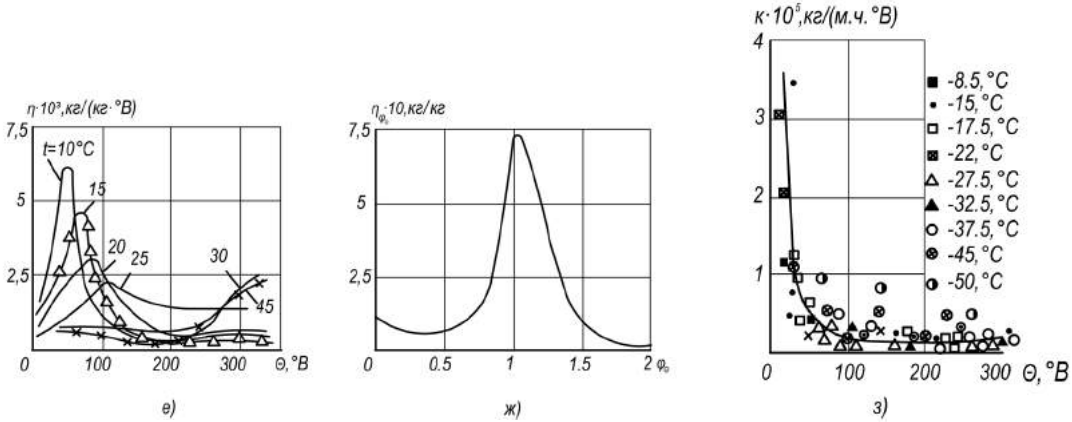


Рис. 9. Изменения во времени z распределения весовой влажности:
а — пенобетона $U_{пб}$; *б* — фильтровальной бумаги $U_{ф.б}$ и *в* — потенциала влажности Θ по длине колонки x,
в опыте с разрезной неизотермической колонкой. Время отсчета в часах: *1* — 0; *2* — 6; *3* — 30; *4* — 48; *5* — 72;
6 — 120; *7* — $z \to \infty$

Характеристики состояния и переноса влаги, полученные в опытах (*а*, *б*, *в*) с разрезной неизотермической колонкой из пенобетона: *г* — зависимость влажности пенобетона $U_{пб}(\Theta, t)$ от потенциала влажности Θ и температуры t; *д* — зависимость влажности пенобетона $U_{пб}(\varphi_\Theta)$ от относительного потенциала влажности φ_Θ; *е* — зависимость удельной влагоемкости пенобетона $\eta(\Theta, t)$ от потенциала влажности Θ и температуры t; *ж* — зависимость влагоемкости пенобетона $\eta_{\varphi_\Theta}(\varphi_\Theta)$ от относительного потенциала влажности φ_Θ; *з* — зависимость коэффициента влагопроводности пенобетона $\kappa(\Theta, t)$ от потенциала влажности Θ и температуры t

достаточно быстро и точно получены все необходимые для расчета нестационарной влагопередачи зависимости из одной серии опытов на одном образце.

Эксперимент состоит в следующем. Испытуемый материал разрезают на пластинки и собирают в виде колонки, в форме цилиндра или призмы. Между пластинками прокладывают пачки листов фильтровальной бумаги. Разрезную колонку, собранную из пластин материала и фильтровальной бумаги, помещают в тепло- и влагоизолированную обойму и устанавливают между термостатами с разными температурами. Между термостатами одновременно ставят несколько разрезных колонок. Они могут быть из одного материала при разных начальных влажностях или из разных материалов. В процессе опыта обоймы периодически вынимают, колонки разбирают, пластины материала и пачки фильтровальной бумаги взвешивают, а затем снова быстро собирают и устанавливают на место.

Получают промежуточные распределения влажности по длине колонки, а в конце опыта, когда перераспределение влаги прекращается, устанавливают состояние влажностного равновесия в колонке. Этих данных достаточно для определения всех зависимостей влажностных характеристик состояния и переноса влаги в материале. По стационарному равновесному распределению влажности, так же как и при построении шкалы Θ, определяют зависимость $U(U_{ф.б})$ и $U(\Theta, t)$ или $U(\varphi_\Theta)$. Дифференцированием изотерм $U(\Theta, t)$ определяют удельную изотермическую влагоемкость материала η, дифференцированием $U(\varphi_\Theta)$ — зависимость влагоемкости η_{φ_Θ} от φ_Θ.

Результаты в виде $U(\Theta, t)$ и $\eta(\Theta, t)$ необходимы также для дальнейшего определения влагопроводности материала — нахождения зависимости коэффициента влагопроводности κ от Θ и t. Для этого используют промежуточные распределения влажности в колонке до установления равновесия. Примененный в эксперименте прием разрезной колонки позволяет воспользоваться для обработки промежуточных данных конечно-разностными методами. Для каждого расчетного интервала времени между измерениями может быть записано уравнение баланса влаги в отдельной пластине колонки. Из опыта известно изменение во времени потенциала влажности каждой пластины и по установившемуся состоянию определены $U(\Theta, t)$ и $\eta(\Theta, t)$. В уравнении баланса влаги пластины за

расчетный интервал времени в результате остается одно неизвестное — коэффициент влагопроводности $\kappa(\Theta, t)$. Его численное значение при данной влажности и температуре пластины можно получить из уравнения баланса влаги, считая κ в пределах данного пространственно-временного интервала неизменным. Пластины колонки в течение опыта изменяют влажность, температуру, имеют разные значения потенциала влажности и в результате в течение одного опыта на одной колонке материала перекрывается широкий диапазон этих параметров. Анализом переходного процесса изменения тепловлажностного состояния пластин материала одного образца в виде разрезной колонки удается получить практически полную картину зависимости $\kappa(\Theta, t)$. Анализировать данные для получения $\kappa(\Theta, t)$ удобно с помощью ЭВМ.

Результаты опыта с образцом пенобетона приведены на рис. 9.

Зависимости $U_{пб}(\Theta, t)$; $U_{пб}(\varphi_\Theta)$; $\eta(\Theta)$; $\eta_{\varphi_\Theta}(\varphi_\Theta)$ определены из серии опытов по установившимся распределениям влажности в колонке. Кривые распределения потенциала влажности $\Theta(x, z)$ на различные моменты времени (рис. 9, *в*) получены путем пересчета кривых распределения влажности фильтровальной бумаги $U_{ф.б}(x, z)$ (рис. 9, *б*) с помощью шкалы $U_{ф.б}(\Theta, t)$ (рис. 2). Зависимость влагопроводности пенобетона $\kappa(\Theta, t)$ (рис. 9, *з*) найдена по данным $\Theta(x, z)$ решением обратной задачи. Аналогичные данные для ряда ячеистых бетонов, кирпича, пеносиликата и других материалов получены в МИСИ, НИИ строительной физики и в других институтах [3, 5, 7, 12, 15].

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ

Обоснование потенциала влажности как основной характеристики состояния влаги в материале в процессе влагопередачи, полученное термодинамическим методом, недостаточно. Нужна экспериментальная проверка этого положения.

Специально были продуманы и реализованы несколько целевых экспериментов, которые должны были убедительно доказать, что только потенциал влажности Θ полностью определяет состояние влаги в материале (его влагосодержание) в самых разнообразных условиях и ситуациях.

Было найдено 5 постановок целевых экспериментов, которые бы безоговорочно доказывали выдвинутое на основе термодина-

мического анализа утверждение о правомерности использования потенциала влажности как основного и единственного показателя, определяющего влажностное состояние материала в конструкции. Все целевые эксперименты предполагали использование хорошо отработанной и проверенной множеством опытов методики неизотермической (и изотермической) разрезной колонки.

Доказать и подтвердить экспериментально надо следующее.

1. В условиях неизотермического влажностного равновесия поток влаги в любом сечении и во всех фазах (жидкой, парообразной, твердой) отсутствует, если grad $\Theta = 0$, т.е. $i(x) = 0$ только если grad Θ по x равен нулю.

2. Влажность материала, выраженная через его влагосодержание U, определяется только видом материала, величиной потенциала влажности Θ и температурой t. Ни начальное влагосодержание U_0, ни наличие градиентов влажности, температуры и потенциала влажности (а следовательно и проходящие потоки теплоты и влаги) никакого влияния на U не оказывают и U является функцией только Θ и t в данном сечении (точке).

3. На упомянутую в п. 2 зависимость, что U является функцией только Θ и t, не оказывает влияние наличие всякого рода контактов и стыков между слоями одного и того же материала.

4. Внешнее давление сжатия на многослойную конструкцию колонки материала так же не оказывает заметного влияния на то, что U есть функция только Θ и t.

5. Если слоистая конструкция колонки состоит из разных материалов, то это тоже не оказывает заметного влияния на то, что U отдельных материальных слоев есть функция только Θ и t.

Ниже дано достаточно подробное описание этих целевых экспериментов и полученных количественных показателей.

1. Одним из доказательств правильности основной концепции о перемещении влаги только под действием градиента потенциала влажности может быть экспериментальное подтверждение отсутствия движения жидкой и парообразной влаги в состоянии неизотермического влажностного равновесия. Потребность в таком доказательстве вызвана еще и тем обстоятельством, что распространено представление о независимом движении пара и жидкости в толще материала, особенно в неизотермических условиях. Принято считать, что жидкая фаза влаги движется под влиянием градиента влагосодержания, а диффузия пара происходит под влиянием градиента парциального давления, и что в условиях неизо-

термического влажностного равновесия эти потоки равны и направлены в противоположные стороны.

В МИСИ Е.И. Тертичником [2] были выполнены специальные опыты с меткой радиоактивного изотопа, вводимой в жидкую влагу материала. Метки закладывали в колонки из фильтровальной бумаги. Одна полностью влаго- и теплоизолированная колонка (основная) находилась между термостатами в состоянии неизотермического влажного равновесия (колонку выдерживали до закладки метки около 7,5 мес.). Сечение, в котором был помещен лист бумаги с радиоактивной меткой, имело следующие характеристики: влагосодержание около 1,9 кг/кг, температура 20 °С, градиент влажности 9,6 кг/(кг · м), градиент температуры 135 °С/м. Вторая колонка находилась в изотермических (t = 20 °С = const) условиях установившейся влагопередачи. Во второй колонке метка была расположена в сечении с влагосодержанием бумаги также около 1,9 кг/кг. Постоянный поток влаги в этом сечении обуславливался градиентом влажности в 5 кг/(кг · м). Влажности в сечениях с метками в обоих образцах были одинаковы, а градиент влажности в основной колонке был почти в два раза больше, чем во второй. Температуры в сечениях тоже были одинаковы, поэтому в основном образце можно было ожидать в два раза большую скорость перемещения метки, чем во втором. Фактически этого не произошло. Спустя две недели в первом образце метка оставалась практически неподвижной, а во втором она была вынесена на торец колонки, т.е. прошла расстояние около 70 мм.

Радиоактивную метку вносили в материал с солью, перемещение которой в образце могло произойти только с влагой в жидкой фазе. В равновесной неизотермической колонке (первый образец) метка не сдвинулась, и поэтому можно утверждать, что жидкая фаза влаги оставалась в ней неподвижной. При неизменном влагосодержании отдельных пачек бумаги в колонке это обстоятельство определяет также отсутствие парообразного переноса влаги и массообмена между фазами влаги. Отсюда следует, что потенциалы фаз влаги в колонке в условиях неизотермического влажностного равновесия равны между собой ($\Theta_ж = \Theta_п = \Theta$) и их градиенты по длине равны нулю. Отсутствие общего потока влаги свидетельствует о постоянстве потенциала влажности Θ по длине колонки.

Результаты опыта подтвердили основное положение теории потенциала влажности о том, что в условиях неизотермического влажностного равновесия при наличии больших градиентов влажности

и температуры потока влаги ни в жидком, ни в парообразном ее состоянии нет, так как градиент потенциала влажности в этих условиях равен нулю, а потенциалы фаз влаги равны между собой.

2. Важным положением термодинамической теории является однозначность определения потенциала влажности Θ влагосодержанием материала при заданной температуре и независимость этой связи от градиента влажности, градиента температуры, начальной влажности.

Для проверки этого положения были испытаны три колонки фильтровальной бумаги с разной начальной влажностью U_0 в разных условиях неизотермического влажностного равновесия. В стационарных равновесных условиях в колонках установились различные перепады температуры и влажности. Но по одному показателю они были идентичны: потенциалы влажности равновесного состояния всех трех колонок были практически равны (разница не превышала 2 °В). Кривые распределения равновесных влажностей и температуры по длине колонок, полученные после длительного их выдерживания, показаны на рис. 4. Оказалось, что в столь разных условиях значения влагосодержания фильтровальной бумаги при одинаковых температурах практически совпадают (табл. 2). Это подтверждает также зависимость $U_{ф.б}$ от t (рис. 10), построенная по данным трех опытов (табл. 2, рис. 4) (при $\Theta \approx \text{const}$).

Таблица 2

Равновесное влагосодержание фильтровальной бумаги при разных температурах в трех разных колонках

t, °С	Опыт 1 Θ = 38,2 °В Δt = (75—18,3) °С U_0 = 0,0609 кг/кг	Опыт 2 Θ = 42 °В Δt = (73,7—20,3) °С U_0 = 0,0615 кг/кг	Опыт 3 Θ = 40,5 °В Δt = (58,5—11,8) °С U_0 = 0,269 кг/кг
25	0,073	0,081	0,085
35	0,049	0,052	0,05
45	0,033	0,038	0,032

Таким образом, опыты с тремя колонками подтвердили, что данному потенциалу влажности при известной температуре соответствует определенное влагосодержание фильтровальной бумаги. Этот результат оказывается достаточно убедительным, так как он получен при наличии различных градиентов потенциала влажности и температуры в сечениях трех колонок, имеющих различные значения начальной влажности.

3. Требовало проверки положение о том, что условия однозначности зависимости влагосодержания от потенциала влажности при одинаковых температурах сохраняются при наличии различных стыков и контактов между слоями из одного и того же материала.

Состояние влаги во влажном материале зависит только от потенциала влажности и температуры (см. формулу 12). Стыки и контакты между слоями материалов могут изменять интенсивность переноса влаги, но они не должны влиять на показатели состояния влаги в материале.

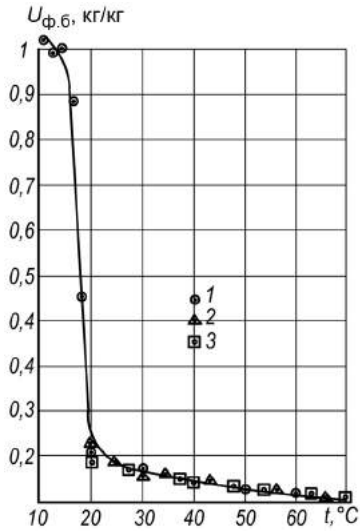


Рис. 10. Зависимость влажности фильтровальной бумаги от температуры *t* в равновесных условиях при постоянном Θ около 40 °В

Испытывали колонки из одного материала в состоянии неизотермического влажностного равновесия при $\Theta_{ср}$. Между термостатами закладывали колонки из газосиликата и пенобетона с близкими начальными значениями влагосодержания и приблизительно одинаковыми перепадами температуры. Испытывали для каждого материала одну сплошную и три разрезные колонки. Одна из последних была собрана с листами фильтровальной бумаги между пластинами, вторая — с крошкой из материала, в третьей промежуточного материала между пластинами не было. Результаты опытов приведены в табл. 3 и на рис. 11.

Как видно, кривые распределения влажности материалов во всех случаях довольно хорошо совпали независимо от принятых условий контакта на стыке. Вместе с тем было отмечено, что время установления в колонках равновесного режима неодинаково, т.е. наличие стыков явилось дополнительным сопротивлением переносу влаги. В сплошной колонке без стыков равновесное влажностное состояние достигалось значительно быстрее.

Такой же результат получен на трех смешанных разрезных колоннах, собранных из фильтровальной бумаги, газосиликата, пенобетона при близких значениях потенциала влажности (см. рис. 12 и табл. 5).

Таблица 3

Распределение влагосодержания пластин в колонках из газосиликата (ρ = 710 кг/м^3)

№ колонки	Тип колонки	Влагосодержание пластин, расположенных от холодного торца, мм										Θ, °В
		5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	
1	Сплошная	0,552	0,525	0,454	0,312	0,154	0,1	0,061	0,046	0,04	0,032	$\Theta_{ср}$ = 66 °В
2	С разрезами (только)	0,502	0,485	0,524	0,29	0,128	0,095	0,05	0,045	0,038	0,03	
3	Разрезная с листочками фильтровальной бумаги	0,49	0,475	0,418	0,28	0,125	0,09	0,046	0,044	0,032	0,03	
4	Разрезная с крошкой из газосиликата	0,46	0,450	0,42	0,27	0,126	0,085	0,047	0,045	0,035	0,031	

Таблица 4

Распределение влагосодержания пластин в колонках из пенобетона (ρ = 678 кг/м^3)

№ колонки	Тип колонки	Влагосодержание пластин, расположенных от холодного торца, мм					Θ, °В
		10	20	50	70	90	
1	Сплошная	0,41	0,36	0,42	0,052	0,025	
2	С разрезами (только)	0,37	0,345	0,235	0,049	0,025	
3	Разрезная с листочками фильтровальной бумаги	0,426	0,375	0,26	0,05	0,025	$\Theta_{ср}$ = 118 °В
4	Разрезная с крошкой из газосиликата	0,385	0,345	0,23	0,05	0,025	

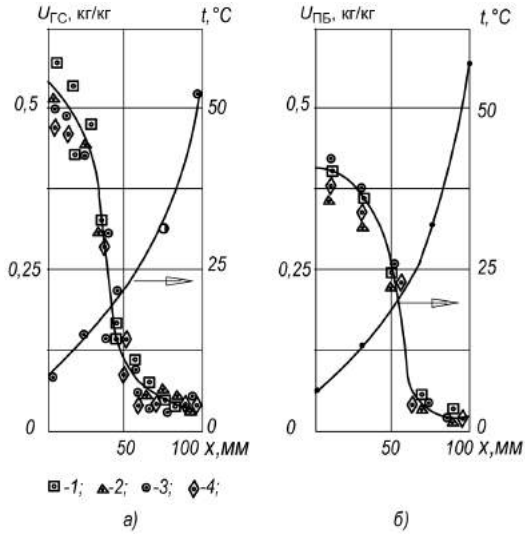


Рис. 11. Опыты со сплошной (1) и разрезными колонками из
а — газосиликата; *б* — пенобетона без промежуточного материала между пластинами (2), с фильтровальнлй бумагой (3) и с крошкой материала (4) между пластинами. *1*, *2*, *3*, *4* — номера колонок по табл. 3 и 4

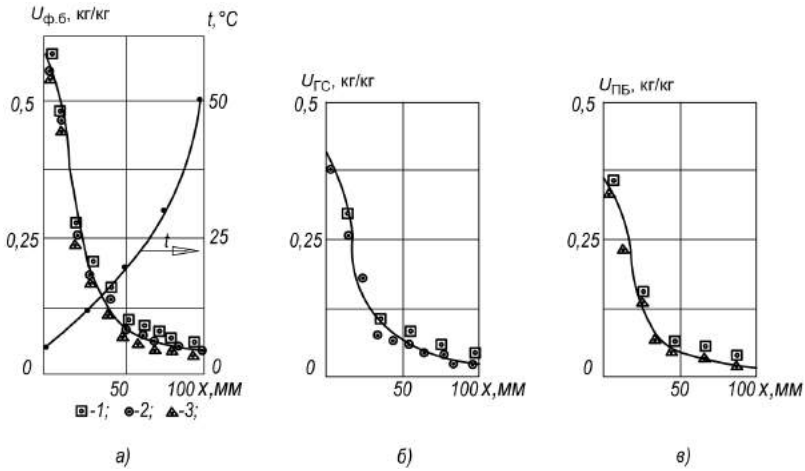


Рис. 12. Неизотермическое влажностное равновесие:
а — фильтровальной бумаги; *б* — газосиликата; *в* — пенобетона в трех смешанных разрезных колонках, собранных из разных материалов, при близких значенних потенциала влажности. *1*, *2*, *3* — номера колонок по табл. 5

4. На трех других образцах, собранных из пластин пенобетона и фильтровальной бумаги, проверяли влияние степени сжатия колонки. Распределение влажности по длине колонок в условиях неизотермического влажностного равновесия и в этом случае (при сжатии силой 5, 10 и 15 кгс) незначительно различалось, хотя при увеличении силы сжатия время, в течение которого устанавливалось влажностное равновесие, заметно уменьшалось. Такие же результаты получены в опытах с газосиликатом.

5. Требовалось также проверить, не влияют ли на влажностное состояние материала его контакты с другими материалами. В условиях неизотермического влажностного равновесия пластины из разных материалов, собранные в разрезную колонку, должны иметь одинаковый потенциал влажности.

В смешанных колонках, составленных из разных пластин, каждому материалу при известной температуре должно соответствовать определенное влагосодержание независимо от того, пластины какого материала слева и справа находятся с ним в контакте, так как по длине колонки в установившемся состоянии потенциал влажности одинаковый.

В условиях неизотермического влажностного равновесия испытывали смешанные разрезные колонки, собранные из пластин пенобетона, газосиликата и листов фильтровальной бумаги в разных сочетаниях (рис. 12, табл. 5).

Условия опытов были подобраны так, чтобы после установления влажностного равновесия потенциалы влажности в колонках были приблизительно одинаковыми. Распределение температур по длине колонок было почти одинаковым, поэтому распределение влажности пластин из одного материала в разных колонках также должно было совпадать (дискретно по сечениям, где были пластины из данного материала).

Независимо от того, как были собраны колонки, распределение влажности различных материалов по длине в установившихся условиях влажностного равновесия остается практически неизменным. Таким образом, серия опытов с колонками из различных материалов подтвердила, что потенциал влажности при известной температуре независимо от наличия или отсутствия контактов с другими материалами определяет влажностное состояние материала.

Выше были изложены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие главный вывод, полученный на основе

Таблица 5

Влагосодержание пластин из разных материалов трех разрезных колонок в условиях неизотермического влажностного равновесия

Расстояние от холодного торца колонки, мм	№ колонки и значение потенциала влажности						
	1, Θ = 39,4 °В			2, Θ = 36 °В		3, Θ = 31,4 °В	
	фильтровальная бумага	газозоло-силикат	пенобетон	фильтровальная бумага	газозоло-силикат	фильтровальная бумага	пенобетон
0	0,58	—	—	0,55	—	0,535	—
5	—	—	0,35	—	0,375	—	0,335
10	0,475	—	—	0,465	—	0,44	—
15	—	0,29	—	—	0,255	—	0,225
20	0,27	—	—	0,255	—	0,24	—
25	—	—	0,15	—	0,18	—	0,14
30	0,203	—	—	0,18	—	0,17	—
35	—	0,1	—	—	0,075	—	0,065
40	0,154	—	—	0,14	—	0,11	—
45	—	—	0,06	—	0,063	—	0,045
50	0,092	—	—	0,085	—	0,075	—
55	—	0,0755	—	—	0,0555	—	—
60	0,085	—	—	0,075	—	0,065	—
65	—	—	0,045	—	0,045	—	0,04
70	0,07	—	—	0,066	—	0,054	—
75	—	0,0445	—	—	0,043	—	—
80	0,06	—	—	0,058	—	0,05	—
85	—	—	0,03	—	0,0255	—	0,025
90	0,053	—	—	0,051	—	0,0495	—
95	—	0,0225	—	—	0,025	—	—
100	0,05	—	—	0,05	—	0,049	—

термодинамического анализа, о необходимости и правомерности использования потенциала влажности в качестве показателя состояния влаги в материале при построении теории влагопередачи через ограждения.

5. МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ ОГРАЖДЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Наиболее сложным и важным вопросом тепломассообменного процесса в наружном ограждении здания является отыскание равновесной влажности теплоизоляционного или иного материального слоя многослойной конструкции в установившемся эксплуатационном состоянии, в условиях реальных внешних (дождь, ветер, солнце и др.) и внутренних (конденсация, технологическая влага) воздействий. Такой именно пример, как нам кажется, может быть убедительным доказательством широких возможностей нового метода расчета на основе потенциала влажности.

Влажностное состояние ограждений в процессе их работы в здании можно условно разделить на два характерных вида: эксплуатационное, соответствующее продолжительному периоду эксплуатации здания, и начальное, соответствующее первым годам эксплуатации после заселения здания (рис. 13).

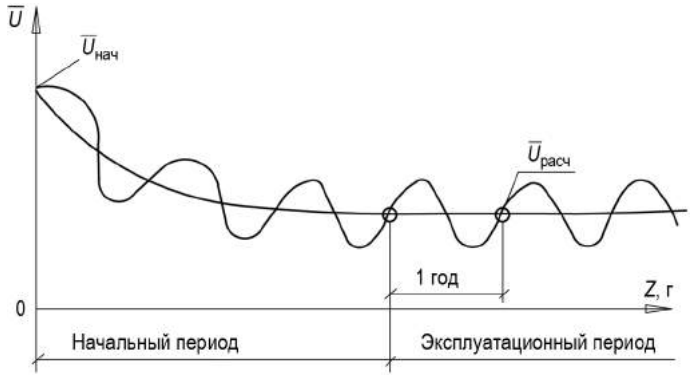


Рис. 13. Схема изменения средней влажности материала в ограждении с начала эксплуатации здания

Эксплуатационное влажностное состояние ограждения наступает, когда влагосодержание материалов приближается к некоторому стабильному состоянию, равновесному относительно воз-

действующих на ограждение внутренней и наружной сред. Влагосодержание в этот период периодически изменяется в течение года около своего постоянного среднегодового значения, несколько возрастая в апреле—мае и понижаясь к концу осени. Зимой, в декабре—январе, значения влажности близки к средним за год. Теплотехнический расчет ограждений и подсчет теплопотерь помещениями выполняют для расчетного зимнего периода, который обычно приходится на январь. Поэтому теплофизические характеристики материалов (которые зависят от их влажности) ограждения нужно выбрать исходя из данных об установившейся среднегодовой их влажности.

Наиболее полно влажностный режим материалов ограждений может быть описан с помощью потенциала влажности Θ и относительного потенциала φ_Θ, пользуясь которыми можно оценить влажностное состояние внутреннего воздуха помещения, самих материалов конструкций и комплексное влажностное воздействие наружной среды на ограждение. Материал, подвергаясь тепловлажностному воздействию окружающей среды, приобретает некоторую равновесную этой среде влажность. Она соответствует определенным значениям Θ, t или φ_Θ. Следовательно, влажностное воздействие среды может быть определено по равновесной влажности, которую приобретает в этих условиях материал, и измерено с помощью Θ, t и φ_Θ. В условиях стационарной влагопередачи ограждение имеет некоторое равновесное совместному действию внутренней и наружной сред влажностное состояние. В однослойном ограждении, если принять в первом приближении условия влагопроводности и влагообмена на внутренней и наружной поверхностях одинаковыми, среднее значение потенциала влажности толщи ограждения равно

$$\Theta_{\text{Т}} = \frac{\Theta_{\text{В}} + \Theta_{\text{Н}}}{2}, \tag{23}$$

где $\Theta_{\text{В}}$ и $\Theta_{\text{Н}}$ — потенциалы влажности, соответственно, внутренней и наружной сред.

Эксплуатационная влажность материалов в ограждении, необходимая для расчета теплопередачи, равна среднегодовому значению в условиях установившихся периодических изменений воздействий окружающих сред. Для расчета средних за период условий достаточно рассмотрение стационарной влагопередачи. Зависимость (23) можно использовать для определения наиболее сложной

характеристики процесса — среднегодового значения потенциала наружной среды

$$\Theta_{Н} = 2\Theta_{Т} - \Theta_{В}. \qquad (24)$$

Величину $\Theta_{В}$ в (24) достаточно точно можно принять равной среднему за год значению потенциала влажности внутреннего воздуха (см. рис. 3). Имеются данные натурных наблюдений за влажностью однослойных кирпичных, шлакобетонных и подобных им стен зданий (во многих географических районах), эксплуатируемых длительное время. По этим данным можно, зная среднегодовые значения температуры и влажности материала толщи ограждения, определить потенциал влажности $\Theta_{Т}$ (необходимый для расчета по формуле (24)) с помощыо зависимости $U(\Theta, t)$.

Воспользуемся предложенным В.М. Ильинским[1] [1, 2] делением территории нашей страны на три характерные влажностно-климатические зоны (карта трех основных влажностных зон территории страны приведена в нормах). Для каждой зоны характерен определенный уровень влажностного воздействия наружной среды на ограждение зданий. Этот уровень воздействия для территории всей зоны может быть установлен по отдельным географическим пунктам, расположенным в данной зоне. Примем в качестве опорных пунктов Санкт-Петербург, расположенный во влажной зоне, Москву — в зоне нормальной влажности и Иркутск — в сухой зоне. Для этих городов Б.Ф. Васильевым[2] [11] приведена среднегодовая влажность кирпичных стен для зданий, длительное время находившихся в эксплуатации. С помощью зависимости $U_{К}(\Theta, t)$ для красного кирпича (рис. 14), зная среднегодовые значения средней влажности UK и температуры кирпичных стен зданий, можно найти $\Theta_{Т}$. В табл. 5 приведены данные $\Theta_{В}$ и $\Theta_{Т}$, по которым по формуле (24) рассчитаны $\Theta_{Н}$ — значения потенциала влажности наружной среды. К зонам одинакового влажностного воздействия на ограждения относятся районы с различными температурными условиями. В связи с этим потенциал влажности $\Theta_{Н}$ наружной среды заметно изменяется внутри зоны. Учитывая это обстоятельство, для оценки уровня воздействия на ограждения наружного климата отдельных

---

[1] Имеется в виду книга В.М. Ильинского «Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий)». М., 1974. Данные из этой книги приведены в [1, 2].

[2] Имеется в виду книга Б.Ф. Васильева «Натурные исследования температурно-влажностного режима крупнопанельных зданий». М., 1968.

влажностных зон удобно использовать шкалу относительного потенциала влажности. Если измерить этот уровень в шкале φ_Θ для географического района, расположенного в определенной влажностной зоне, то это значение $\varphi_{\Theta_н}$ можно распространить на всю зону, для которой он будет постоянным. В табл. 6 приведены значения $\varphi_{\Theta_н}$ для трех влажностно-климатических зон и использованные для этого данные о тепловлажностном состоянии внутренней среды $\Theta_В$ и $t_В$ и материала однородного кирпичного ограждения.

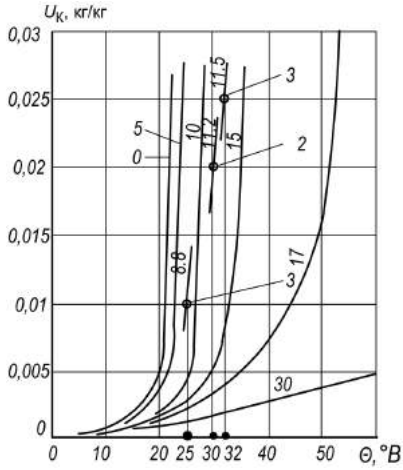


Рис. 14. Зависимость $U_К(\Theta, t)$ для красного кирпича с нанесенными на нее значениями равновесных среднегодовых влажностей кирпичных стен:
1 — среднегодовая влажность кирпичных стен в Санкт-Петербурге;
2 — то же в Москве; *3* — то же в Иркутске;
цифры на кривых — средняя температура толщи кладки, °С

Таблица 6

Потенциалы влажности внутренней среды помещения ($\Theta_В$), материала толщи наружного ограждения ($\Theta_Т$) и относительного потенциал влажности наружной среды нормативных влажностных зон ($\varphi_{\Theta_н}$)

Город	Влажностная зона	Характеристики тепловлажностного состояния								
		внутренний климат			материал толщи ограждения			наружный климат		
		$t_В$	$\varphi_В$	$\Theta_В$	$t_Т$	$U_Т$	$\Theta_Т$	$t_{год}$	$\Theta_Н$	$\varphi_{\Theta_н}$
Санкт-Петербург	Влажная	18,7	59,1	29	11,5	0,025	32	4,2	35	2,15
Москва	Нормальная	18,8	59,1	30	11,2	0,02	30	3,6	30	2
Иркутск	Сухая	18,7	59	29	8,8	0,01	25	–1,2	21	1,5

Относительный потенциал $\varphi_{\Theta_н}$ влажностного воздействия на ограждения наружного климата — сложный показатель. Он учитывает среднее за год суммарное действие на ограждение не только температуры, влажности наружного воздуха, но и осадков, скорости и направления ветра, солнечной радиации и др., т.е. всех характеристик наружной среды, так или иначе влияющих на влажностное состояние ограждений. Потенциал влажности $\Theta_н$ для любого района внутри зоны можно вычислить по $\varphi_{\Theta_н}$ и среднегодовой температуре наружного воздуха в этом районе, пользуясь зависимостями $U_{ф.б}(\Theta, t)$ и $\varphi_\Theta(U_{ф.б})$ (см. рис. 2, 5).

Сопоставляя полученные таким образом данные с фактическими параметрами наружного климата в тех или иных регионах можно получить приближенную формулу для расчета $\Theta_н$.

Комплексное тепловлажностное воздействие наружного климата на ограждение, которое названо потенциалом влажности наружного климата $\Theta_н$, в основном определяется следующими параметрами климата: температурой $t_н$ и относительной влажностью воздуха $\varphi_н$, интенсивностью и продолжительностью осадков $i_н$, направлением и скоростью ветра $\upsilon_н$, интенсивностью и продолжительностью солнечной радиации q. В настоящее время получена приблизительная зависимость:

$$\Theta_н = f(t_н, \varphi_н, i_н, \upsilon_н, q),$$

данные расчета по которой [6] представлены на рис. 15.

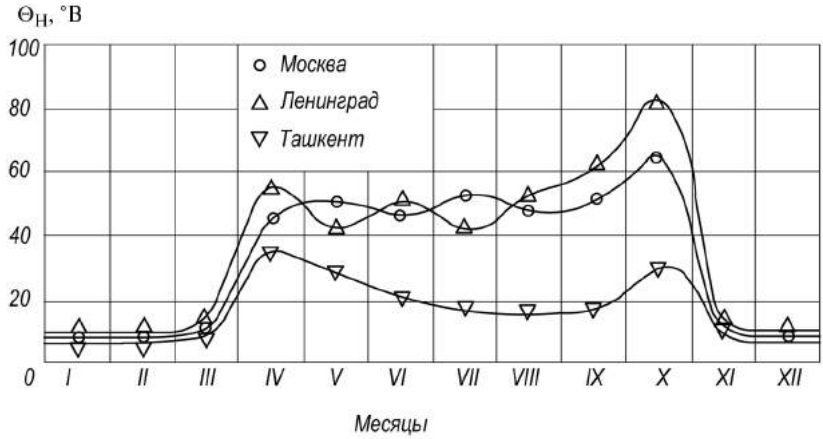


Рис. 15. Годовой ход потенциала влажности наружного климата $\Theta_н$, полученный расчетом по данным метеорологических наблюдений

В табл. 6 потенциал $\Theta_В$ принят для жилых помещений. В общем же случае влажностное состояние в помещении, воздействующее на ограждение, следует также оценивать в шкале относительного потенциала влажности. Средние за год параметры внутреннего воздуха в помещениях зависят от их назначения и в определенной мере от места расположения здания. Оценивая влажностное состояние различных помещений с помощью величины $\varphi_{\Theta_В}$ можно по фактическим данным о $t_В$ определить потенциал влажности $\Theta_В$ их внутренней среды. В табл. 7 приведены значения $\varphi_{\Theta_В}$, полученные расчетом для помещений четырех градаций влажностного режима, принятых в нормах.

Зная $\Theta_В$ и $\Theta_Н$, можно из условия стационарной влагопередачи определить среднегодовое эксплуатационное влажностное состояние любого слоя материала многослойного ограждения. Потенциал влажности слоя ограждения, соответствующий этому состоянию, равен:

$$\Theta_{сл} = \Theta_В - \overline{R}_{В-сл}(\Theta_В - \Theta_Н), \qquad (25)$$

где $\overline{R}_{В-сл}$ — относительное сопротивление влагопередаче, равное отношению сопротивления влагопередаче от внутренней среды до середины рассматриваемого слоя многослойного ограждения к общему сопротивлению влагопередаче ограждения.

Эксплуатационное влажностное состояние слоя материала зависит не только от величины $\Theta_{сл}$, но и от средней за год его температуры $t_{сл}$, рассчитываемой по формуле, аналогичной (25), поэтому его влажностное состояние также удобно определить относительным потенциалом влажности $\varphi_{\Theta_{сл}}$.

Установим связь между рассмотренной методикой расчета влажностного состояния материалов в ограждении и рекомендациями норм по выбору их характеристик. В нормах даны три градации значений характеристик, которые соответствуют различной степени увлажнения материалов. Характеристики рекомендуется выбирать только в зависимости от влажностного режима помещений и влажностно-климатической зоны строительства. В нормативном методе не учитывается расположение материала в конструкции, поэтому эти рекомендации, строго говоря, применимы только для расчета однослойных ограждений. В табл. 8 приведены данные, полученные с учетом значений $\varphi_{\Theta_Н}$ и $\varphi_{\Theta_В}$, которые позволили определить диапазоны значений $\varphi_{\Theta_{сл}}$, соответствующие трем градациям

Таблица 7

Относительный потенциал влажности внутренней среды помещений с различным влажностным режимом

Назначение помещения	Температурно-влажностные условия в помещении (среднегодовые)					Влажностный режим помещения (по нормам)	Предлагаемые градации $\varphi_{\Theta_В}$
	$t_В$	$\varphi_В$	$\Theta_В$	$U_{ф.б}$	$\varphi_{\Theta_В}$		
Проектное бюро, чертежный зал, библиотека	19	до 45	до 23	0,064	0,44	сухой	до 0,45
Жилой дом, поликлиника, детский сад, ясли	19	до 50	до 24,5	0,072	0,51	нормальный	до 0,53
Душевые и раздевальные при них	25	59—75	37—61	0,068—0,096	0,47—0,67	влажный	до 0,66
Бани, прачечные	30	более 75	более 110	более 0,095	более 0,66	мокрый	более 0,66

Таблица 8

Эксплуатационное влажностное состояние материалов в однослойном ограждении

Влажностный режим помещения		Градация норм и $\varphi_{\Theta_{сл}}$ для влажностных климатических зон строительства					
режим помещения	относительный потенциал влажности $\varphi_{\Theta_В}$	сухой $\varphi_{\Theta_Н} = 1,5$		нормальной $\varphi_{\Theta_Н} = 2$		влажной $\varphi_{\Theta_Н} = 2,15$	
		графа	$\varphi_{\Theta_{сл}}$	графа	$\varphi_{\Theta_{сл}}$	графа	$\varphi_{\Theta_{сл}}$
Сухой	до 0,45	А	0,97	А	1,22	Б	1,3
Нормальный	от 0,45 до 0,53	А	1,01	А	1,27	Б*	1,34
Влажный	от 0,53 до 0,66	Б	1,08	Б*	1,33	Б*	1,4
Мокрый	более 0,66	Б*	более 1,08	Б*	более 1,33	Б*	более 1,4

норм, принятым для выбора теплофизических характеристик материалов (графы А, Б и Б*).

Анализ данных табл. 7 показывает определяющее влияние на влажностный режим ограждений наружной среды (для мокрых помещений внутренняя среда также значительно влияет на состояние ограждений). Как видно из таблицы, вероятно, правильно к группе Б* относить ограждения всех зданий влажной зоны, ограждения мокрых помещений всех трех зон и влажных помещений нормальной влажностной зоны. Ограждения зданий других влажностных режимов помещений в зоне с нормальной влажностью — к группе Б; в сухой зоне — к группе А.

На основе табл. 7 можно принять определенные диапазоны относительного потенциала влажности $\varphi_{\Theta_{сл}}$ материалов в слоях, соответствующие принятым в нормах градациям (табл. 9):

Таблица 9

Градации норм	Диапазон значений $\varphi_{\Theta_{сл}}$
А	До 1,1
Б	1,1—1,3
Б*	Свыше 1,3

Последовательность выбора теплофизических характеристик материалов в многослойных ограждениях с учетом их эксплуатационной влажности предлагается следующей. В расчет принимается среднегодовой режим влагопередачи ограждения. Определив влажностную зону $\varphi_{\Theta_н}$ и среднюю за год температуру наружного воздуха, находим $\Theta_Н$. Зная назначение помещения, устанавливаем $t_В$, потенциал влажности внутренней среды $\Theta_В$ и $\varphi_{\Theta_в}$. Вычисляем для отдельных слоев ограждения $\Theta_{сл}$, $t_{сл}$ и находим $\varphi_{\Theta_{сл}}$. По значению $\varphi_{\Theta_{слл}}$ определяем градации норм, по которым принимаем значения теплофизических характеристик материалов слоев ограждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод расчета влажностного режима материалов в ограждающих конструкциях здания, основанный на теории термодинамического полного неизотермического потенциала влажности. Он выгодно отличается от используемых в настоящее время методов, которые основываются на других представлениях о состоянии

и перемещении влаги. Главные из ныне применяемых методов расчета влагопередачи основаны:

1. На теории диффузии пара в сорбирующей среде. Часто в этом методе отдельно учитывается миграция жидкой (в основном сверхгигроскопической) влаги под влиянием градиента влагосодержания [12, 11].

2. На теории влаго- и термовлагопроводности с использованием так называемого коэффициента термовлагопроводности. В изотермических условиях перемещение влаги (без разделенеия на фазы) определяется только градиентом влагосодержания [7].

3. На шкале капиллярного потенциала [8, 14, 16,17].

4. На шкале испарительного капиллярного потенциала с дополнительным использованием эффекта термовлагопроводности [15].

Положительные отличия метода термодинамического полного неизотермического потенциала влажности в следующем:

1. Возможность расчета во всем диапазоне влажности от сухого состояния материала до состояния его полного насыщения для многослойных конструкций в неизотермических условиях.

2. Использование во всем диапазоне влажности и температуры единой шкалы состояния влаги в материале, отсутствие в расчетах искусственно введенного коэффициента термовлагопроводности.

3. Применение единого дифференциального уравнения процесса с коэффициентами проводимости и емкости для влаги без разделения ее на фазы.

4. Безусловный и единственно правильный учет граничного условия IV рода на стыке материальных слоев в виде равенства потенциалов влажности материалов и потоков влаги на стыке.

5. Возможность учета влажностного влияния окружающих сред в единой шкале потенциала влажности. Особенно это важно для наружной среды при совместном действии влажности и температуры воздуха, косых дождей, ветра, действия солнечной радиации, когда потенциал влажности наружной среды выполняет роль обобщенного комплексного показателя влажностного воздействия среды.

6. Возможность использования относительного потенциала влажности как обобщающего показателя, значительно упрощающего экспериментальные определения характеристик и получаемых расчетом частных решений влажностных полей и потоков влаги.

7. Возникает возможность значительного упрощения расчетов многомерных полей, совместного рассмотрения температурного, влажностного и аэродинамических полей. Последнее обстоятельство особенно важно для современных сложных конструкций с повышенными сопротивлениями теплопередаче.

Приведенная в заключительном разделе методика показывает по существу неограниченные возможности предложенной теории для решения самых сложных вопросов влагопередачи и влажностного состояния материала в конструкциях современных зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. Москва, 1982.

2. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. Москва, 1979.

3. Богословский В.Н. Расчет тепловлажного режима наружных ограждений зданий методом гидравлических аналогий. Кандидатская диссертация. Москва, 1953.

4. Богословский В.Н. О потенциале влажности ИФЖ. Т. 8. № 2. Москва, 1965.

5. Богословский В.Н., Тертичник Е.И. Шкала относительного потенциала влажности и ее использование для оценки влажностного режима ограждений. Сб.тр. Москва: МИСИ. 1969. № 68.

6. Богословский В.Н., Абрамов Б.В. К определению потенциала влажности наружного климата. Сб.тр. Москва: МИСИ. 1978. № 144.

7. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. Москва, 1954.

8. Власов О.Е. Основы теории капиллярной диффузии. ЦНИИПС, 1940.

9. Де Грот С.Р. Термодинамика необратимых процессов. Москва, 1956.

10. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. Москва, 1958.

11. Ушков Ф.В. Метод расчета увлажнения ограждающих частей зданий. Москва, 1955.

12. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Москва, 1973.

13. Шорин С.Н. Теплопередача. Москва, 1964.

14. Цытович Н.А., К теории равновесного состояния влаги в мерзлых грунтах // Доклады АН СССР. 1952. Вып. 82. № 6.

15. Перехоженцев А.Г. Исследование процессов влагопереноса в пористых строительных материалах при решении задач прогноза

влажностного состояния неоднородных ограждающих конструкций зданий. Докторская диссертация. Москва: НИИСФ, 1998.

16. Kiessl K. Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetrnsport in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation Universität-Gesamthochshule Essen, 1983.

17. Künzel H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One-and two-dimensional calculation using simple parametrs. Dissertation, Universitet Stuttgart, 1995.

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

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ ДО И ПОСЛЕ В.Н. БОГОСЛОВСКОГО

1. ВВЕДЕНИЕ

В строительной теплофизике понятие потенциала влажности прочно связано с именем В.Н. Богословского. В начале 1950-х гг. Вячеслав Николаевич, будучи аспирантом, занимался исследованием влажностного режима ограждающих конструкций. Для описания влагопереноса он пытался использовать изотермический потенциал влажности по аналогии с химическим потенциалом, предложенным Дж. Гиббсом. Плотность потока влаги предполагалась равной градиенту этого потенциала, умноженному на коэффициент влагопроводности. При этом влагоперенос, обусловленный температурным градиентом, приходилось описывать дополнительным слагаемым — градиентом температуры с коэффициентом термовлагопроводности. Такой подход требовал экспериментального определения двух коэффициентов влагопереноса, но позволял при проведении расчетов уйти от раздельного учета множества механизмов влагопереноса. В такой постановке влагоперенос был описан А.В. Лыковым в опубликованной в то время книге [1].

В.Н. Богословский продвинулся дальше по пути описания процесса влагопереноса при помощи потенциала влажности. Он предложил неизотермический потенциал влажности [2]. Плотность потока влаги предполагалась пропорциональной градиенту этого потенциала с коэффициентом влагопроводности к. Потенциал влажности В.Н. Богословского являлся аналогом температуры в теории теплопереноса, коэффициент влагопроводности — аналогом коэффициента теплопроводности, а закон влагопроводности, записанный при помощи этого потенциала, был аналогичен закону теплопроводности Ж. Фурье. Введение такого потенциала влажности представлялось эффективным шагом к упрощению математической модели и, соответственно, метода расчета влажностного режима ограждающих конструкций при учете всех механизмов влагопереноса, даже тех, которые еще и не были известны. Можно

считать, что в этом отношении В.Н. Богословский исходил из феноменологической точки зрения на природу, которую сформулировал Ж. Фурье первой фразой своего введения в «Аналитическую теорию теплоты» [3]: «Первопричины явлений нам неизвестны; но они подчиняются простым и постоянным законам, которые можно открыть путем наблюдения и изучение которых составляет предмет натуральной философии».

Дальнейшие исследования, проведенные учениками и последователями В.Н. Богословского, показали, что влагоперенос не всегда удобно описывать с позиций теории неизотермического потенциала влажности. Простота уравнения влагопереноса кажущаяся, поскольку коэффициент влагопроводности сложным образом зависит как от влажности, так и от температуры. Пренебречь этой зависимостью невозможно, экспериментальное ее определение крайне сложно, а решение уравнения влагопереноса не упростилось по сравнению с методами, не опирающимися на данный потенциал влажности. Были разработаны другие потенциалы влажности (например [4, 5]), представляющие большие удобства с практической точки зрения, но не обладающие той общностью, какая присуща потенциалу влажности В.Н. Богословского. Использование таких потенциалов влажности не дает особых преимуществ по сравнению с методами раздельного учета различных механизмов влагопереноса.

В связи с этим представляет интерес рассмотрение исторического развития понятия потенциала влажности, а также рассмотрение условий, при которых можно перейти от раздельного учета механизмов влагопереноса к описанию этого явления при помощи единого потенциала влажности. Важность этой проблемы осознавал и В.Н. Богословский, о чем свидетельствует наша совместная с ним публикация [6].

2. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ПОТЕНЦИАЛА В ФИЗИКЕ ПОЧВ

Термины «потенциал», «потенциальная функция» характеризуют широкий класс физических силовых полей. Понятие потенциала возникло в связи с описанием векторного поля. Сама идея введения такой функции, производная которой по определенному направлению дает ньютоновскую силу притяжения, принадлежит Ж. Лагранжу (1772 г.) и П. Лапласу (1782 г.) [7, 8]. «Теория потен-

циала» создана независимо Дж. Грином в 1828 г. и К. Гауссом в 1840 г. [8]. Не совсем ясно, откуда К. Гаусс взял слово «потенциал» [8], но именно оно закрепилось за этим понятием. К. Гаусс определил понятие потенциала как «возможную работу», т.е. как ту работу, «которую следовало бы затратить, чтобы привести точечный электрический заряд из бесконечности в данное место» [8, с. 51]. Это определение (определение 1) близко к тому, которое применяется в термодинамике [9] и определяется из уравнения:

$$dU = PdE. \tag{1}$$

где U — внутренняя энергия системы; E — обобщенный заряд; P — потенциал, который можно определить, как «скорость изменения внутренней энергии с зарядом» [9].

В то же время в векторном анализе термином потенциал векторного поля, заданного в пространстве, обозначают скалярную функцию от координат пространства, такую, что градиент этой функции в каждой точке пространства совпадает с вектором поля (определение 2). Оба эти определения использовались при построении потенциалов влажности.

Впервые описание влагопереноса в почве при помощи некоторого потенциала (в смысле определения 2) предложил математик Чарльз Самнер Слихтер (C.S. Slichter) (1864—1946 гг.) в 1899 г. [10]. Слихтер получил образование в Германии и в период написания работы был преподавателем прикладной математики университета штата Висконсин (США). К исследованиям перемещения влаги в почвах он был привлечен своим коллегой по университету профессором агрофизики Франклином Хирамом Кингом (F.H. King). Позднее, после написания своей работы [10], Ч. Слихтер основал фирму по исследованиям направления и скорости движения подземных потоков воды при помощи электрических приборов, которая успешно работала. Потенциал Ч. Слихтера представлял собой некоторую ограниченную, непрерывную и однозначную функцию координат, удовлетворяющую уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0. \tag{2}$$

Эту функцию предлагалось определять в соответствии с граничными условиями и решаемой задачей. Ч. Слихтер описал решение задачи о распределении влаги в грунте вокруг скважины артезианского колодца.

Работа Ч. Слихтера [10] явилась пионерской по теории фильтрации в почвах и грунтах. Эта работа послужила основой для работ советских математиков: будущего академика Л.С. Лейбензона (1879—1951 гг.) [11], а затем В.Н. Щелкачева (1907—2005 гг.) [12], выполненных в 1930-х гг. На основе этих работ была создана новая наука «подземная гидравлика», изучающая течение нефти, воды и газа в пористых грунтах. В рамках этой науки и получила свое дальнейшее развитие рассматриваемая теория потенциала. Эта наука широко применяется при разработке нефтяных месторождений [13]. Ч. Слихтер в подземной гидравлике считается «отцом» теории фильтрации.

Другой подход к понятию «потенциал влажности» принят в агрофизике. Пионерские работы в этом направлении выполнены в «Бюро почв» в США и связаны с именами Э. Баккингема (E. Buckingham) (1867—1941 гг.) и Л. Бриггса (L.J. Briggs) (1874—1963 гг.). На примере деятельности этих ученых можно проследить рождение и первоначальное развитие нового подхода к проблеме.

Эдгар Баккингем родился в Филадельфии в состоятельной семье в 1887 г., получил в Гарварде степень бакалавра и остался в университете преподавать физику. В 1889—90 гг. он работал в немецком Страсбургском университете, по-видимому, на кафедре проф. Кольрауша, там же в это время стажировался известный в будущем физико-химик Нернст. В 1890 г. Э. Баккингем возвратился в Гарвард, а в 1893 г. приехал в Германию в Лейпциг и защитил диссертацию на степень доктора философии. Защита им диссертации в Лейпциге не случайна. Там с 1887 г. работал Вильгельм Оствальд, который организовал институт физической химии, и в описываемое время этот институт являлся как бы интернациональным центром исследований по физической химии и частично термодинамике. (У Оствальда работали С. Аррениус, Нернст и др.) В. Оствальд и его окружение были сторонниками энергетического подхода ко всему, в частности, к теории химического сродства. Так, В. Оствальд писал: «...если налицо имеются два тела, оба способные соединяться с третьим, то сильнейшее тело приобретет больше, слабейшее меньше, но ни одно не получит всего, как ни одно не уходит без всякого приобретения» [14]. Выбор Э. Баккингемом места защиты диссертации уже свидетельствует о его научной позиции, а также показывает, что он был к этому моменту сложившимся ученым с научными связями. После защиты диссертации и возвращения в Америку Э. Баккингем работал в нескольких организациях. С 1901 г.

преподавал физику в университете штата Висконсин и опубликовал монографию по термодинамике [15].

В конце XIX в. под руководством М. Витнея было организовано Бюро почв (БП) при департаменте сельского хозяйства США. В 1896 г. в БП был принят Л. Бриггс. М. Витней пригласил на работу одного из самых крупных агрофизиков того время Ф.Х. Кинга, а тот, в 1902 г., в свою очередь, пригласил Э. Баккингема. Можно считать, что Э. Баккингем был знаком с работой Ч. Слихтера, поскольку оба ученых работали в университете штата Висконсин и оба были знакомы с Ф.Х. Кингом. Однако работа Ч. Слихтера не оказала заметного влияния на работу Э. Баккингема, кроме использования термина «потенциал».

Руководителем физической лаборатории в БП был Лиман Джеймс Бриггс. Он родился на ферме недалеко от городка Баттл Крик. В 1893 г. он окончил Мичиганский сельскохозяйственный колледж со степенью бакалавра сельского хозяйства. Затем он учился на физическом факультете Мичиганского университета и получил степень магистра физики в 1895 г. Один год он учился в университете Джона Гопкинса с целью защитить диссертацию. Однако в 1896 г. женился, оставил университет и начал работать в БП. Руководство бюро позволило ему продолжить работу над диссертацией, он стал чем-то вроде соискателя в университете Джона Гопкинса на 1900—1901 учебный год. В течение учебного года Л. Бриггс трижды в неделю ездил из Вашингтона в Балтимор, где работал над диссертацией на тему «Адсорбция на кварце паров воды и некоторых водных растворов солей». В 1901 г. он защитил диссертацию на степень доктора философии (PhD) [16].

Л. Бриггс был на 7 лет моложе Э. Баккингема и не имел такого блестящего образования. Однако, по-видимому, он обладал большим упорством и талантом организатора. В 1905 г. Л. Бриггс, а затем Э. Баккингем в 1906 г. уволились из БП. Причиной увольнения послужили разногласия с М. Витнеем [15]. Э. Баккингем поступил на работу в Национальное бюро стандартов (НБС), он первым получил в НБС редкий для США статус свободного исследователя. Э. Баккингем больше никогда не занимался физикой почв, его дальнейшие работы были посвящены акустике, термодинамике, теории размерностей и т.д. В частности он доказал знаменитую π-теорему. В 1937 г. он вышел на пенсию. Биографические данные о Э. Баккингеме содержатся в словарях и энциклопедиях ученых США. Л. Бриггс перешел из Бюро почв в Бюро растениеводства, а

затем в 1919 г. в НБС, где сделал успешную карьеру и стал директором НБС. Во время Второй мировой войны Л. Бриггс был одним из руководителей Манхэттенского проекта по созданию атомной бомбы. Благодаря последнему обстоятельству его биография хорошо описана в литературе [16]. После окончания войны Л. Бриггс вышел на пенсию, но остался работать в качестве почетного исследователя в НБС. Его работы этого периода касались исследований отрицательного капиллярного давления. Важно отметить, что по свидетельству дочери Э. Баккингема Катарины Баккингем Хант, сделанному в 1970-х гг., между Э. Баккингемом и Л. Бриггсом сохранялись дружеские отношения, которые распространились на их семьи [16].

В своих работах, выполненных в Бюро почв, Л. Бриггс исследовал влагосодержание и движение влаги в почве. Названия его работ следующие [16]: «Механика почвенной влаги» (1897 г.), «Электрические инструменты для определения влажности, температуры и содержания растворимых солей в почвах» (1899 г.), «Центробежный метод механического анализа почв» (1904 г.) и, наконец, «Влажностные эквиваленты почв» (1907 г.) [17]. Работы Л. Бриггса позволяют проследить развитие положений о движении почвенной влаги, основанных на механических представлениях.

В работе Л. Бриггса [17] было введено понятие влажностного эквивалента, которое определяется как *равновесная влажность почвы, подвергнутой центрифугированию с постоянной скоростью*. Поскольку влажностный эквивалент — это влажность почвы, которая находится в равновесии с некоторой определенной силой, то сделан вывод, что ряд почв, которые достигли равновесия с одной и той же силой, будут находиться в «капиллярном» равновесии друг с другом, если их привести в контакт [17]. Этот вывод эквивалентен сформулированному позднее В.Н. Богословским [2, 19] постулату: «два влажных тела, находящиеся во влажностном равновесии с третьим, находятся во влажностном равновесии и друг с другом». Логически этот постулат вытекает из положения о химическом сродстве веществ в трактовке В. Оствальда [14], и Л. Бриггс предложил способ механического определения такого равновесия влажностей. По существу, предложенный Л. Бриггсом метод механического определения влажностного эквивалента почвы является предшественником метода определения потенциала влажности при помощи разрезной колонки, описанного В.Н. Богословским [19] и А.В. Лыковым [1], только метод Л. Бриггса пригоден для изотермических условий и для механической формы связи влаги с материалом.

В 1907 г., уже после ухода из Бюро почв Э. Баккингэма, была опубликована его ставшая знаменитой работа «Исследования движения почвенной влаги» [18]. В этой работе Э. Баккингэм определил потенциал ψ как меру взаимодействия почвы и влаги, которая не наблюдается непосредственно, но связана с влажностью почвы. Влажность почвы он определил как количество сантиграммов воды, приходящихся на один грамм твердого вещества почвы, это соответствовало весовой влажности в процентах. Предполагая, что если силы взаимодействия между влагой и почвой являются консервативными, то они имеют потенциал, можно прийти к простой концепции механического потенциала, однако, как отмечает Э. Баккингэм, более последовательное экспериментальное исследование процесса приведет к понятию термодинамического потенциала. Э. Баккингэм дал следующее определение «капиллярного потенциала» (влажности) ψ: «Это работа, требующаяся, чтобы удалить из почвы (в бесконечность) один сантиграмм воды». Он также предложил метод определения зависимости ψ от влажности u, при этом он рассматривал только работу против силы тяжести, т.е. он рассматривал только механическую форму связи влаги в почве, причем пренебрегал работой против сил сопротивления при движении воды в почве. Таким образом, Э. Баккингэм вначале исходил из механического представления о влагопереносе в почве. Далее он провел ряд опытов, которые позволили ему получить зависимости потенциала влажности от влажности почв. Рассмотрел он и влагопроводность и пришел к выводу, что она так же (нелинейно) зависит от влажности почвы. Экспериментально полученные результаты позволили ему предложить уравнение влагопереноса, основанное на использовании капиллярного потенциала влажности:

$$Q = \lambda \frac{\partial \psi}{\partial x}, \tag{3}$$

где в обозначениях Э. Баккингэма Q — поток влаги; λ — влагопроводность.

Э. Баккингэм сформулировал следующее положение: «Если подвергнуть различные почвы одной и той же силе, удаляющей влагу, то осушение почв будет разным, но окончательная величина капиллярного потенциала будет одинаковой». Это положение Э. Баккингэма эквивалентно постулату В.Н. Богословского и положению Л. Бриггса, причем «капиллярный потенциал» Э. Баккингэма оказался как бы эквивалентен «влажностному эквиваленту» Л. Бриггса. Подход Э. Баккингэма к определению потенциала оказался термо-

динамическим, поскольку основан на энергии связи влаги с почвой. В почвоведении для расчетов влагопереноса стал использоваться «капиллярный потенциал» Э. Баккингэма.

Теория потенциала влажности получила дальнейшее развитие в работах В. Гарднера (Willard Gardner) [20, 21], который развил работы Э. Баккингэма и Л. Бриггса, а затем Л. Ричардса (Lorenzo Adolph Richards, 1904—1993 гг.) [22]. В своей первой научной публикации Л. Ричардс, после обобщения исследований Э. Баккингэма и В. Гарднера, предложил схемы приборов для определения капиллярного потенциала почв [22]. Приборы, разработанные Л. Ричардсом, применяются в настоящее время [23, 24, 25]. Л. Ричардс подчеркивал разницу определений потенциала, данного Э. Баккингэмом и В. Гарднером, и принял точку зрения последнего, согласно которой потенциал есть работа, требующаяся для того, чтобы перенести единицу массы воды из точки с нулевым потенциалом в рассматриваемую точку [22]. Практически такое же определение потенциала влажности почвы принято в настоящее время. Комиссия, избранная на Седьмом международном конгрессе почвоведов, дала следующее определение: «Полный потенциал влаги — работа, которая должна быть затрачена (в расчете на 1 грамм чистой воды) для того, чтобы обратимо и изотермически перенести в заданную точку почвы бесконечно малое количество воды из объема чистой воды, находящегося при атмосферном давлении и на условном высотном уровне сравнения» [26]. Благодаря принятому единому подходу, в исследованиях влагопереноса в почвах достигнут значительный прогресс.

Методы расчетов миграции влаги в почве используют шкалу капиллярного потенциала. Детально разработаны и успешно применяются различные приборы и методы экспериментального определения потенциала влажности в этой шкале [25, 27]. Потенциал влажности, используемый в почвоведении, является изотермическим. Если возникает необходимость учета влагопереноса, обусловленного наличием градиента температуры, то эту составляющую учитывают отдельно [27]. Аналогичный прием применен и А.В. Лыковым [1, 28]. Основной практический интерес для почвоведов представляют влажности почвы, значительно превышающие максимальную сорбционную, такая влажность соответствует физико-механической форме связи влаги с почвой. Поэтому для потенциала влажности почвы используется шкала «капиллярного давления» почвенной влаги.

Практический интерес для строителей представляет влажность материалов ограждений, соответствующая их сорбционному увлажнению или незначительно превышающая их максимальную сорбционную влажность. Этой влажности материалов соответствуют как физико-химическая так и физико-механическая формы связи влаги с материалом. Поэтому, к сожалению, не представляется возможным напрямую использовать имеющиеся в почвоведении наработки. К тому же неизотермический влагоперенос в ограждениях играет значительно бóльшую роль, чем в почве. Тем не менее, подход с использованием «капиллярного потенциала» влажности часто используется в строительстве вследствие своего удобства при проведении реальных расчетов. Например, потенциал влажности, используемый К. Кислем (K. Kieβ1) [5], представляет собой логарифмическую зависимость потенциала от радиуса капилляра:

$$\varphi = 1{,}7 + 0{,}1 \cdot \lg(r). \qquad (4)$$

Этот потенциал, хотя и очень удобен с практической стороны, не является неизотермическим и потому не обладает всеми преимуществами, которые связаны с применением потенциала влажности.

В [9] рассматривается несколько уравнений связи работы с элементарными формами движения: гидродинамической, фильтрационной, гравитационной, диффузионной и химической. Эти уравнения одинаковы по форме. Для последней формы движения это уравнение имеет вид:

$$dQ = \mu dm, \qquad (5)$$

где μ — химический потенциал, Дж/кг; m — химическая масса, кг.

Выражение (5) впервые было получено Гиббсом в 1874 г. [9] На основании того, что указанные уравнения по форме идентичны (5) и потенциал в них сопряжен с массой, его принято называть химическим, что приводит к некоторой путанице [9]. При рассмотрении сложных процессов, когда происходят несколько различных элементарных движений одновременно, которые описываются уравнениями вида (5), их объединяют в одно уравнение, а соответствующий потенциал называют общим, несмотря на то, что элементарные движения имеют совершенно различную природу. Этот прием нельзя признать обоснованным, однако он применяется, например, в [25]. Еще меньше оснований для объединения, если рассматривать элементарные движения в трехмерном пространстве, в неизотермическом случае, т.е. когда имеет место еще и термическая форма движения.

В.Н. Богословский ввел общий потенциал влажности, который объединял различные формы «элементарных движений». Градиент общего потенциала влажности определяет неизотермический влагоперенос. Первоначально этот потенциал не имел термодинамического обоснования, и В.Н. Богословский фактически ввел это понятие неявно, используя определение 2. В.Н. Богословским была предложена шкала потенциала влажности, основанная на равновесной влажности фильтровальной бумаги [2, 19]. Детально эта шкала была проработана Е.И. Тертичником [29, 30]. Потенциал влажности материала в этой шкале зависит от влажности и температуры. Несмотря на недостатки, эта шкала сейчас является наиболее разработанной в теории потенциала влажности. Основным недостатком этой шкалы является энергетическая неравноценность градуса влажности при малых и больших значениях влажности материала. Невелик запас экспериментальных данных о влажностных характеристиках строительных материалов, необходимых для практического применения теории потенциала влажности с использованием этой шкалы. Возможно, этими причинами объясняется сравнительно медленное внедрение расчетов, основанных на теории потенциала влажности, в практику исследования влажностного режима ограждающих конструкций.

В строительной теплофизике ко времени введения В.Н. Богословским понятия потенциала влажности в начале 50-х гг. XX в. уже имелся значительный опыт расчетов влажностного режима ограждений «непотенциальными» методами и были накоплены соответствующие влажностные характеристики строительных материалов. Поэтому целесообразно установить связь между этими методами. Первые шаги в этом направлении сделаны методами векторного анализа [6, 33].

3. ВЕКТОРНОЕ ПОЛЕ ПОТОКА ВЛАГИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОМ МАТЕРИАЛЕ И ЕГО ПОТЕНЦИАЛ

Механизмы переноса влаги в капиллярно-пористых телах подробно описаны в работах А.В. Лыкова [1, 28], Б.В. Дерягина [31], Н.В. Чураева [32] и др. Влага в капиллярно-пористых телах перемещается в виде пара, пленок и жидкости под действием градиентов различных потенциалов переноса. Известно более двух десятков различных механизмов влагопереноса, не считая движения влаги под действием силы тяжести (поскольку этот случай соответствует

недопустимому переувлажнению материалов ограждающих конструкций).

Наиболее известными механизмами влагопереноса являются:

- молярный перенос пара в макрокапиллярах;
- диффузия пара в макрокапиллярах;
- диффузия пара в мезокапиллярах или эффузия;
- изотермическое скольжение молекул пара вдоль стенок капилляра;
- неизотермическое скольжение пара вдоль стенок капилляра;
- термодиффузии пара в макрокапиллярах;
- фильтрация жидкой влаги;
- капиллярное поднятие воды;
- движение воды под действием градиента капиллярного давления (потенциала);
- капиллярный осмос;
- термокапиллярное течение;
- термоосмотическое течение;
- перенос влаги под действием градиента расклинивающего давления;
- термокапиллярное течение пленок;
- течение незамерзающих пленок воды, в том числе термокристаллизационное течение пленок.

Соответствующие этим механизмам уравнения влагопереноса имеют вид:

$$\boldsymbol{g}_i = -k_i \cdot \mathbf{grad}\, \theta_i, \tag{6}$$

где θ_i — частный потенциал влагопереноса, °В$_i$; k_i — соответствующий коэффициент влагопереноса, кг/(м · с · °В$_i$); $\boldsymbol{g}_i$ — соответствующая плотность потока влаги, кг/(м^2 · с).

Полную плотность потока влаги в материале можно выразить уравнением:

$$\boldsymbol{G} = -\sum_{i=1}^{n} k_i \cdot \mathbf{grad}\, \theta_i, \tag{7}$$

где $k_i = k_i\,(\theta_1, \theta_2, ..., \theta_n)$.

Использовать это уравнение для расчета влажностного режима ограждающих конструкций практически невозможно из-за трудностей экспериментального определения всех коэффициентов k_i и сложной взаимосвязи между потенциалами θ_i. Рассмотрим вопрос существования и построения общего потенциала влажности.

Рассмотрим ограниченный объем влажного материала, пусть он занимает некоторую часть пространства V. Каждой точке этого пространства соответствует набор частных потенциалов $\{\theta_i\}$ и вектор $\boldsymbol{G}$, определенный уравнением (7). Следовательно, можно говорить о векторном поле $\boldsymbol{G}$, определенном в пространстве V.

Определение. Векторное поле $\boldsymbol{G}$, заданное в пространстве V, называется *потенциальным*, если существует скалярная функция $\tilde{\theta}(x, y, z)$, называемая *потенциалом* векторного поля, определенная в пространстве V, такая, что для любой точки этого пространства выполняется равенство:

$$\boldsymbol{G} = -\mathbf{grad}\ \tilde{\theta}. \tag{8}$$

4. УСЛОВИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОСТИ ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ ПОТОКА ВЛАГИ

Необходимым и достаточным условием потенциальности векторного поля $\boldsymbol{G}$ является выполнение в любой точке пространства V равенства:

$$\mathbf{rot}\,\boldsymbol{G} = 0. \tag{9}$$

Рассмотрим условия, при которых векторное поле, определенное уравнением (7), является потенциальным. Используя правила векторного анализа из (9) получаем:

$$\begin{aligned}\mathbf{rot}\,\boldsymbol{G} &= \mathbf{rot}\left[-\sum_{i=1}^{n} k_i \cdot \mathbf{grad}\,\theta_i\right] = -\sum_{i=1}^{n} \mathbf{rot}\left(k_i \cdot \mathbf{grad}\,\theta_i\right) = \\ &= -\sum_{i=1}^{n}\left(\mathbf{grad}\,k_i \cdot \mathbf{grad}\,\theta_i\right) - \sum_{i=1}^{n}\left(k_i \cdot \mathbf{rot}\left(\mathbf{grad}\,\theta_i\right)\right).\end{aligned} \tag{10}$$

Последнее слагаемое в (10) равно нулю в силу сформулированного выше необходимого и достаточного условия потенциальности векторного поля, а также по определению потенциального поля. Следовательно, из (10) получаем:

$$\mathbf{rot}\,\boldsymbol{G} = -\sum_{i=1}^{n}\left(\mathbf{grad}\,k_i \cdot \mathbf{grad}\,\theta_i\right). \tag{11}$$

Как следует из (11), в общем случае поле $\boldsymbol{G}$ не является потенциальным. Однако в некоторых частных случаях это поле потенциально. Укажем два таких случая:

1. Если влагоперенос в пространстве V можно рассматривать как одномерный, то для каждого значения векторы **grad** k_i и **grad** θ_i будут коллинеарны и правая часть (11) будет равна нулю. Следовательно, в этом случае поле $\boldsymbol{G}$ — потенциально.

2. Если для каждого значения i коэффициент k_i является функцией только соответствующего потенциала θ_i, тогда

$$\mathbf{grad}\, k_i = \frac{dk_i}{d\theta_i} \cdot \mathbf{grad}\, \theta_i. \tag{12}$$

Доказательство основано на том, что после подстановки (12) в (11) получается, что правая часть (11) обращается в нуль. Следовательно, в этом случае поле $\boldsymbol{G}$ — потенциально.

Докажем теорему, которая может использоваться при рассмотрении потенциальности поля влагопереноса.

Теорема. Пусть векторное поле, определяемое уравнением (7), потенциально при количестве частных потенциалов, равном n. Введем еще один частный потенциал (n+1)-й. Тогда достаточным условием для того, чтобы векторное поле, определяемое уравнением (7), при количестве частных потенциалов (n+1) было потенциально, является выполнение системы равенств:

$$\frac{\partial k_{n+1}}{\partial \theta_i} = \frac{\partial k_i}{\partial \theta_{n+1}} \quad \text{для } i = 1, 2, \ldots, n. \tag{13}$$

Для доказательства выразим **grad** k_i по известной формуле:

$$\mathbf{grad}\, k_i = \sum_{j=1}^{n+1} \frac{\partial k_i}{\partial \theta_j} \mathbf{grad}\, \theta_j. \tag{14}$$

Подставив (14) в (11) получим:

$$\mathbf{rot}\, \boldsymbol{G} = -\sum_{i=1}^{n+1}\left[\sum_{j=1}^{n+1}\left(\frac{\partial k_i}{\partial \theta_j}\mathbf{grad}\, \theta_j\right) \cdot \mathbf{grad}\, \theta_i\right] =$$

$$= -\sum_{i=1}^{n}\left[\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\partial k_i}{\partial \theta_j}\mathbf{grad}\, \theta_j\right) \cdot \mathbf{grad}\, \theta_i\right] - \sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\partial k_{n+1}}{\partial \theta_j}\mathbf{grad}\, \theta_j\right) \cdot \mathbf{grad}\, \theta_{n+1} - \tag{15}$$

$$-\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial k_i}{\partial \theta_{n+1}}\mathbf{grad}\, \theta_{n+1} \cdot \mathbf{grad}\, \theta_i\right) - \frac{\partial k_{n+1}}{\partial \theta_{n+1}}\mathbf{grad}\, \theta_{n+1} \cdot \mathbf{grad}\, \theta_{n+1}.$$

Четвертый член правой части последнего выражения равен нулю, поскольку векторное произведение вектора самого на себя равно нулю. Первый член равен нулю вследствие принятого по условию теоремы потенциальности векторного поля при n частных потенциалах. Вторая и третья суммы имеют независимые индексы суммирования и одинаковые пределы суммирования, поэтому (15) можно записать в виде:

$$\mathbf{rot}\,\boldsymbol{G} = -\sum_{i=1}^{n}\left[\mathbf{grad}\,\theta_i \cdot \mathbf{grad}\,\theta_{n+1}\left(\frac{\partial k_{n+1}}{\partial \theta_i} - \frac{\partial k_i}{\partial \theta_{n+1}}\right)\right]. \qquad (16)$$

Из (16) следует, что если выполняется условие (13), то правая часть (16) обращается в нуль, следовательно, поле $\boldsymbol{G}$ — потенциально, что и требовалось доказать. Подчеркнем, что условие (13) является достаточным, но не необходимым. Т.е. это условие не исчерпывает все случаи потенциальности поля, но если оно выполняется, то поле обязательно потенциально. Отметим еще, что при $n = 1$ поле всегда потенциально.

Рассмотрим необходимые и достаточные условия существования потенциала. Пусть имеем потенциальное поле, определенное уравнением (7), θ — потенциал этого поля, тогда:

$$\boldsymbol{G} = -\mathbf{grad}\,\theta = -\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial \theta}{\partial \theta_i}\mathbf{grad}\,\theta_i. \qquad (17)$$

Из сопоставления (17) и (7) получим, что для того, чтобы функция $\theta(\theta_1, ..., n)$ являлась потенциалом поля, определенного (2), необходимо и достаточно выполнение системы уравнений:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \theta_i}(\theta_1, ..., \theta_n) = k_i(\theta_1, ..., \theta_n) \text{ для } i = 1, ..., n. \qquad (18)$$

Доказательство этого утверждения представляется излишним ввиду его очевидности.

5. ПРИМЕР ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ ПОТОКА ВЛАГИ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛЕ

В качестве примера рассмотрим математическую постановку задачи, фактически принятую К.Ф. Фокиным [34]. Если учитывать только поток парообразной влаги по уравнению

$$\boldsymbol{G} = -\mu \cdot \mathbf{grad}\, e, \tag{19}$$

то векторное поле, определяемое этим уравнением, является потенциальным при условии, что μ не зависит от температуры и влажности. Если добавить поток жидкой влаги, то уравнение (19) принимает вид:

$$\boldsymbol{G} = -(\mu \cdot \mathbf{grad}\, e + \beta \cdot \mathbf{grad}\, w), \tag{20}$$

где $\beta = 0$ при влажности меньшей максимальной сорбционной, и $\beta = \beta(w)$ при влажности большей максимальной сорбционной. Система (13) выполняется для поля заданного уравнением (20):

$$\frac{\partial \mu}{\partial w} = 0; \frac{\partial \beta}{\partial e} = 0. \tag{21}$$

Первое равенство справедливо, так как μ является константой, второе справедливо, поскольку при $e < E$ выполняется $\beta = 0$, а при $e = E$ коэффициент β не зависит от e. Следовательно, условие (13) выполняется, и на основании доказанной теоремы поле, определяемое (20), потенциально. Следует отметить, что в (20) пренебрегли зависимостью β от температуры. Если же этой зависимостью не пренебрегать, то о потенциальности рассматриваемого поля ничего сказать нельзя.

В данной математической постановке приняты следующие обозначения:

w — влажность материала по массе, кг/кг;

e — парциальное давление водяного пара, Па;

E — парциальное давление насыщенного водяного пара, Па;

μ — коэффициент паропроницаемости материала, кг/(м · с · Па), (1 кг/(м · с · Па) = $0{,}28 \cdot 10^{-9}$ мг/(м · ч · Па));

β — коэффициент влагопроводности материала, кг/(м · с · кг/кг) (1 кг/(м · с · кг/кг) = $0{,}28 \cdot 10^{-6}$ г/(ч · м · кг/кг).

Таким образом, удалось доказать, что поле потока влаги является потенциальным лишь в ограниченном числе случаев. В общем случае потенциальность поля (7) доказать не удалось. Однако условие потенциальности поля является более сильным, чем существование потенциала влажности, предложенного В.Н. Богословским.

В некоторых случаях систему (20) можно легко решить и получить явное выражение для потенциала, например, для потенциала поля, заданного уравнением (20), решением будет функция:

$$\theta = \mu e + \int_0^w \beta(\varsigma) d\varsigma. \qquad (22)$$

Легко убедиться, что подстановка этого уравнения в (8) приведет к уравнению (20). Именно эту функцию В.В. Козлов принял в качестве потенциала влагопереноса и разработал метод расчета влажностного состояния ограждающих конструкций на основании этого потенциала [35, 36].

Очевидно, что система дифференциальных уравнений (18) имеет не единственное решение и возможны и другие построения потенциала влажности.

6. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ПОТЕНЦИАЛАМИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Выше было рассмотрено однородное пространство. Важным с практической точки зрения является случай, когда пространство состоит из нескольких подпространств, обладающих отличающимися свойствами влагопереноса, при этом эти подпространства имеют границы друг с другом. Например, соприкасающиеся в ограждении слои из различных строительных материалов. В каждом из этих материалов определено свое векторное поле (7) и, если эти поля потенциальны, то в каждом материале имеется свой потенциал. В общем случае эти потенциалы отличаются друг от друга, и на границе соприкосновения материалов имеется разрыв. Поэтому важной является задача выбора такого потенциала, чтобы на границе он был непрерывным. Для решения этой задачи примем постулат, сформулированный В.Н. Богословским (а также Л. Бриггсом и Э. Баккингамом) о том, что если два тела находятся во влажностном равновесии с третьим, то они находятся во влажностном равновесии и между собой. Введем эталонное тело, пусть в нем имеются частные потенциалы $\{\theta_i\}$ и общий потенциал θ. В соприкасающемся с ним материале также имеются частные потенциалы $\{\theta_i^1\}$ и общий потенциал θ^1, причем они связаны уравнениями равновесия:

$$\theta_i^1 = f_i(\theta_i),\ i = 1, ..., n. \qquad (23)$$

Найдем уравнение связи потенциала θ^1 с потенциалом θ:

$$\theta^1 = F(\theta). \qquad (24)$$

Рассмотрим точку на границе двух соприкасающихся материалов. Для этой точки можно записать:

$$\mathbf{grad}\,\theta^1 = \sum_{i=1}^{n} k_i^1(\theta_1^1, \ldots, \theta_n^1)\mathbf{grad}\,\theta_i^1. \tag{25}$$

Подставляя сюда (24) получим:

$$F'\mathbf{grad}\,\theta = \sum_{i=1}^{n} k_i^1(\theta_1^1, \ldots, \theta_n^1)\mathbf{grad}\,\theta_i^1. \tag{26}$$

Умножив скалярно обе части этого уравнения на **grad** θ, после преобразования получим:

$$\frac{d\theta^1}{d\theta} = \sum_{i=1}^{n} k_i^1(\theta_1^1, \ldots, \theta_n^1)\frac{(\mathbf{grad}\,\theta_i^1 \cdot \mathbf{grad}\,\theta)}{\left|\mathbf{grad}\,\theta\right|^2}. \tag{27}$$

Обозначим правую часть уравнения (27) символом κ, тогда решая уравнение (27) получим:

$$\theta^1 = \int_{\theta_0}^{\theta} \kappa d\theta + \theta^1(\theta_0). \tag{28}$$

По-другому уравнение (27) можно представить в виде:

$$\mathbf{grad}\,\theta^1 = \kappa \cdot \mathbf{grad}\,\theta, \tag{29}$$

где

$$\kappa = \sum_{i=1}^{n} k_i^1(\theta_1^1, \ldots, \theta_n^1)\frac{(\mathbf{grad}\,\theta_i^1 \cdot \mathbf{grad}\,\theta)}{\left|\mathbf{grad}\,\theta\right|^2}. \tag{30}$$

Т.е. в рассматриваемом случае можно во всем пространстве (многослойной конструкции) считать в качестве потенциала θ, но в каждом подпространстве (слое материала) плотность потока влаги будет выражаться уравнением (29) и в каждом подпространстве (слое материала) будет свой коэффициент, который у В.Н. Богословского имеет название коэффициента влагопроводности. Как следует из приведенного вывода, этот коэффициент по своему математическому смыслу не является коэффициентом влагопроводности, а является коэффициентом перехода от градиента одного потенциала к градиенту другого. Можно также отметить, что коэффициент κ зависит не только от потенциалов, но и от градиентов потенциалов. Коэффициент κ может быть в некоторых случаях даже отрицательным. Такой сложный коэффициент серьезно осложняет рас-

четы с использованием потенциала влажности. Однако полученная формула (30) дает возможность расчетного определения коэффициента к без проведения сложных экспериментов.

Таким образом, методами векторного анализа рассмотрены обоснования введения понятия и использования потенциала влажности для описания влагопереноса в ограждающей конструкции. Получено условие потенциальности векторного поля потока влаги в материале и условия, позволяющие строить потенциал векторного поля потока влаги. Приведен пример построения потенциала влажности в постановке расчетного метода последовательного увлажнения К.Ф. Фокина. Выявлен физический смысл коэффициента влагопроводности в теории потенциала влажности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют развивать методы расчета влажностного режима ограждающих конструкций в направлении их упрощения без потери полноты учета различных механизмов влагопереноса.

Большой заслугой В.Н. Богословского можно считать введение им потенциала влажности, имеющего более общий характер, чем разработанный ранее в почвоведении капиллярный потенциал. Этот вклад в науку имеет фундаментальный характер и открывает новые возможности в развитии учения о переносе влаги в капиллярно-пористых телах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лыков А.В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. М., 1954. 296 с.

2. Богословский В.Н. Исследования температурно-влажностного режима наружных ограждений зданий методом гидравлических аналогий. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1954.

3. Fourier J. Teorie analytique de la chaleur. Paris, 1822.

4. Перехоженцев А.Г. Потенциал переноса влаги влажных капиллярно-пористых материалов // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. 1992. № 2. С. 101—104.

5. Kieβl K. Kapillarer und dampfformiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation. Essen. 1983. 124 S.

6. Богословский В.Н., Гагарин В.Г. Потенциал влажности. Теоретические основы // Российская академия архитектуры и строительства. Вестник отделения строительных наук. 1996. Вып. 1. С. 12—14.

7. Битюцков В.И. Потенциал // В кн. Математический энциклопедический словарь. М., 1995. С. 478—479.

8. Клейн Ф. Лекции о развитии математики в XIX столетии. М.; Л., 1937. 483 с.

9. Вейник А.И. Термодинамика. Минск, 1968. 464 с.

10. Slichter C. Theoretical investigation on the motion of ground water // United States Geological Survey, 19-th annual report 1897—98. Part 2. Washington, 1899. Pp. 294—384.

11. Лейбензон Л.С. Нефтепромысловая механика. Ч. 2. Подземная гидравлика воды, нефти и газа. М.; Л.: Горгеолнефтеиздат, 1934. 352 с.

12. Щелкачев В.Н., Пыхачев Г.Б. Интерференция скважин и теория пластовых водонапорных систем. Баку : АзГОНТИ, 1939. 286 с.

13. Щелкачев В.Н. Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации. М., 1995. Ч. 1 586 с., Ч. 2. 491 с.

14. Оствальд В. Энергия и ее превращения // Русское богатство. СПб., 1888. № 7. С. 20.

15. Nimmo J.R., Landa E.R. The Soil Physics Contributions of Edgar Buckingham. // Soil Sci. Soc. Am. J., March–April. 2005. Vol. 69. Pp. ??.

16. Landa, E.R., Nimmo, J.R. Soil history. The life and scientific contributions of Lyman J. Briggs // J. Soil Sci. Soc. Am. 2003. May–June. Vol. 67. No. 3. Pp. 681—693.

17. Briggs, L.J., McLane, J.W. 1907. The moisture equivalents of soils. USDA Bureau of Soils. Bull. No.45. Washington, 1907.

18. Buckingham E. Studies on the movement of soil moisture. U. S. Department of Agriculture. Bureau of Soils. Bul. No. 38. Washington, 1907.

19. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М., 1982. 416 с.

20. Gardner W. The movement of moisture in soil by capillarity // Soil Science. 1919. Vol. 7. No. 4. P. 313—317.

21. Gardner W. The capillary potential and its relation to soil — moisture constants // Soil Science. 1920. Vol. 10. No. 5. P. 357—359.

22. Richards L.A. The usefulness of capillary potential of soil moisture and plant investigations // J. Agricult. Res. 1928. Vol. 37. No. 12. P. 719—742.

23. Gardner W.R. The impact of L.A.Richards upon the field of soil water physics // Soil Science. 1972. Vol. 113. No. 4. P. 232—237.

24. Philip J.R. Fifty Years Progress in Soil Physics // Geoderma. 1974. Vol. 12. P. 265—280.

25. Шеин Е.В. Физика почв. М., 2005. 432 с.

26. Мичурин Б.Н. Энергетика почвенной влаги. Л., 1975. 140 с.

27. Глобус А.М. Физика неизотермического внутрипочвенного влагообмена. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 280 с.

28. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник. М., 1978. 480 с.

29. Тертичник Е.И. Определение влажностных характеристик строительных материалов способом разрезной колонки // Инженерно-физический журнал. 1965. Т. 8. № 12. С. 247—250.

30. Тертичник Е.И. Исследование влажностного состояния наружных ограждений зданий на основе потенциала влажности. Дисс. ... канд. техн. наук. М.: МИСИ, 1966.

31. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М., 1987. 400 с.

32. Чураев Н.В. Физико-химия процессов массопереноса в пористых телах. М., 1990. 272 с.

33. Гагарин В.Г. Исследование потенциальности векторного поля потока влаги в капиллярно-пористом материале методами векторного анализа // Academia. Архитектура и строительство. 2008. № 3. С. 70—73.

34. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. 5-е изд. М., 2006. 256 с.

35. Козлов В.В. Метод инженерной оценки влажностного состояния современных ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты при учете паропроницаемости, влагопроводности и фильтрации воздуха. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, М.: НИИСФ, 2004.

36. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Математическая модель и инженерный метод расчета влажностного состояния ограждающих конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2006. № 2. С. 60—63.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ВОСПОМИНАНИЯ О В.Н. БОГОСЛОВСКОМ

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

Вячеслав Николаевич Богословский родился в профессорской семье в 1923 г. В семье был еще один ребенок — старший брат Николай.

По окончании школы В.Н. Богословский был кратковременно мобилизован на строительство оборонительных сооружений, поступил в МИСИ, затем в октябре добровольцем вступил в Красную армию. В.Н. Богословский на фронте был трижды ранен, в том числе тяжело. Лечился в госпиталях. Был комиссован по состоянию здоровья. Позднее одновременно долечивался и учился в МИСИ им. В.В. Куйбышева на факультете ТГВ.

Профессорская семья и война определили в его жизни многое. Люди поколения войны стали взрослыми исключительно быстро, а в случае с Вячеславом Николаевичем и слишком рано. После отрочества, практически не состоявшейся юности — взрослая жизнь. Выжившие на войне люди обладали исключительной жизненной активностью, жили и за «того парня», и жизненным опытом, лишенным иллюзий, даже с некоторой долей цинизма, который приходит только к человеку, достаточно много пожившему на этой земле.

Вячеслав Николаевич был честолюбив. Он обладал очень тонкой нервной организацией, удивительной способностью улавливать «флюиды» изменений в окружающей обстановке, не ошибался и в истинном отношении к нему конкретного человека, умел точно определять тенденцию развития событий. В нем было что-то от физика Ильи Куликова из фильма «9 дней одного года». Он не боялся, в отличие от многих, привлекать к работе талантливых учеников, могущих составить ему лично конкуренцию, так как был уверен, что всегда будет «на коне». Обладал ораторскими способностями. В нем присутствовало чувство уверенности в себе, ощущение превосходства над своими оппонентами и способность выйти из любого положения. Профессор П.Н. Каменев звал Вячеслава Николаевича не иначе, как «златоуст». Было у него, благодаря происхождению из профессорской семьи, и преимущество в том,

что он хорошо знал особенности научного и преподавательского сообщества тех лет, что он благополучно использовал в своей деятельности.

Талантливым человеком он был безусловно. Но талант научный — явление сложное и многогранное. Вячеслав Николаевич был способен на «озарение», чем не обладали и не обладают многие. Испытать это ни с чем не сравнимое чувство озарения — открытия дано избранным. Но довести идею до ума или практического применения творец идеи не всегда может. В этом и была невидимая постороннему трагедия Вячеслава Николаевича. Люди, подобные Вячеславу Николаевичу, становятся во главе научных школ. Они нуждаются в помощниках-учениках, «качество» которых определяет дальнейшую судьбу «озарения» и практический результат.

Знания основателя научной школы, каким был В.Н. Богословкий, позволяют точно формулировать для многочисленных учеников частные задачи, как составляющие задачи глобального значения. Он мог в общих чертах указывать возможные пути решения проблемы и на правах научного руководителя ожидать результатов. Ученые типа Вячеслава Николаевича великолепно умеют делать обобщение решений этих частных задач, хотя и нуждаются иногда в редакторах своего труда. Потенциал влажности — детище этой большой творческой работы учителя и его учеников.

Эта работа родилась при противостоянии московской школы строительной теплофизики, к которой принадлежал В.Н. Богословский, и А.В. Лыкова и его учеников. Противостояние «школ» было вызвано достаточно некорректным поведением в научном и человеческом плане А.В. Лыкова — профессора кафедры физики Московского института технологии пищевых производств (МТИПП), будущего академика АН БССР. Он возглавлял институт тепло- и массобмена в г. Минске. Будучи талантливым и весьма тщеславным человеком, Алексей Васильевич вместо театральных подмостков или эстрады выбрал научную стезю, как он ее понимал, для получения известности. Алексей Васильевич любил «себя в науке», но не науку, — дело трудное, многодельное, незаметное и на аплодисменты бедное. Владея математикой лучше, нежели прочие специалисты, он стал стремительно расширять свою сферу влияния, обвиняя сушильщиков старой школы (например, Лурье) в слабом теоретическом обеспечении теории сушки.

Но этого ему показалось мало. Он «влез» в теорию теплоустойчивости А.М. Шкловера, в печати обвинив автора в неверности

полученных результатов. Арон Михайлович срочно стал проверять выкладки (по слухам, работал всю ночь) и убедился, что А.В. Лыков прав, некорректность имела место, но она играла заметную роль для малых значений тепловой инерции ограждений D, реальным ограждениям не свойственных. Был и другой результат проверки — инфаркт миокарда у Арона Михайловича, что и произвело неизгладимое впечатление на московских теплофизиков.

Алексей Васильевич был горазд в писании дифференциальных уравнений (не без натяжек), но для решения практических задач, был не пригоден абсолютно.

О дисциплине «Строительная теплофизика»

Главным научным достижением Вячеслава Николаевича является формирование и ввод в учебный процесс специальности 2907 дисциплины «Строительная теплофизика». До Богословского этой дисциплины в учебных планах не было вовсе. Существовали в отдельности:

- теория теплоустойчивости А.М. Шкловера;
- немногочисленные работы Федора Васильевича Ушкова. В частности, Федор Васильевич вывел уравнение температурного поля в однородном ограждении при фильтрации через него постоянного по величине воздушного потока;
- теории увлажнения ограждающих конструкции Константина Федоровича Фокина (или, как звали его ближайшие сотрудники, — «КыФы»).

Книга В.Н. Богословского «Строительная теплофизика» стала значимым явлением в строительной науке. Заявленная как учебник, она является научной работой, не потерявшей своей актуальности и поныне. При жизни Вячеслава Николаевича книга выдержала два издания, была опубликована в Польше, переиздается и теперь. Только после появления этого труда строительная теплофизика оформилась как комплексная, созданная для специальности 2907, наука.

О потенциале влажности

Теория возникла во времена щедрого финансирования государством науки. Выбор темы определен влиянием отца — профессора кафедры механики грунтов МИСИ им. В.В. Куйбышева. В области механики грунтов было известно понятие потенциала влаги. Вя-

чеслав Николаевич был связан и с институтом мерзлотоведения, находившегося тогда в районе улицы Б. Полянка.

Номинально, официальным руководителем аспиранта В.Н. Богословского был профессор П.Н.Каменев, который в этих вопросах ничего не понимал, но фактически работа выполнялась под руководством профессора МТИПП А.В. Лыкова, находившегося тогда на вершине популярности, учредителя и бессменного редактора «Инженерно-физического журнала», открывшего явление термовлагопроводности. По написании диссертации Вячеслав Николаевич изложил суть работы официальному руководителю профессору Каменеву. Тот толком ничего не понял, но подписал диссертацию.

К тому времени существовала и теория паропроницаемости К.Ф. Фокина, описывающая перемещение влаги в пределах сорбционного диапазона влажности. С расчетом влажностного режима многослойных ограждений проблем в этом диапазоне влажности не было, так как рассчитывалось поле парциальных давлений водяного пара, а равновесные влагосодержания определялись по кривым сорбции. При этом на стыке слоев формировался скачок влагосодержаний, что и наблюдалось по факту. С большими влажностями дело обстояло сложнее, так как при сверхгигроскопической влажности в качестве движущей силы использовалась разность влагосодержаний, что для многослойных ограждений не годилось, так как имел место скачок влагосодержаний на стыке слоев.

В те времена сложные расчеты выполнялись аналоговыми методами, применялись токопроводящая бумага, электрические и гидравлический интегратор конструкции В.С. Лукьянова. Вячеслав Николаевич сопоставил уравнение нестационарной теплопроводности и влагопроводности и пришел к выводу, что влагосодержанию соответствует теплосодержание слоя, а роль температуры выполняет некоторый единый для всего диапазона возможного для данного материала влагосодержания потенциал. К этому периоду относятся работы академика П.А. Ребиндера с классификацией влаги по напряженности энергии, связи поглощенной влаги и капиллярно-пористого материала, косвенно подтверждающей энергетическую природу потенциала влажности.

Вячеслав Николаевич рассказал о своих предположениях А.В. Лыкову, который сразу все понял, притормозил работу над диссертацией и опубликовал свою статью, в связи с чем вспоминаются строки из стихотворения А.Н. Некрасова:

Сила ломит и соломушку,
Поклонись пониже ей,
Лишь бы старшие Еремушку
В люди вывели скорей.

Защита диссертации В.Н. Богословского происходила в ауд. 212 здания на Спартаковской. Оппонентом был А.В. Лыков, давший высокую оценку работе. Ученый Совет присудил за работу степень доктора технических наук.

Но «старших» всегда бывает несколько. Старший «страж по ВАКу» профессор Орест Евгеньевич Власов не пропустил решение Ученого Совета МИСИ, сказав в обоснование своего мнения: «Человек молодой. Надо дать ему возможность разработать еще что-то более полезное для строительства».

Судьба потенциала влажности невеселая. Сказалось противостояние «московских» и «лыковцев». Но главным была невостребованность потенциала влажности:

- специальности 2907 потенциал влажности был ни к чему;
- НИИСФ тоже: вопросы определения равновесной влажности решены в рамках традиционных для этого института представлений, а расчеты влажностного режима решаются в рамках теории «КыФы»;
- профессиональные «сушильщики» высушивают мономатериалы;
- на Крайнем Севере раньше сушили перед отделочными работами оштукатуренные стены кирпичных домов, но этого давно нет. Строительство там практически не ведется, многое заброшено, а если что-то и строится, то панельное, уже просушенное.

Опять же турецкий «кисмет», рок судьбы.

Об Антарктиде

Самым впечатляющим фактом биографии Вячеслава Николаевича в послевоенное время было его участие во Второй советской антарктической экспедиции в качестве штатного гляциолога. Факт сам по себе необычный и загадочный: дипломированный инженер по отоплению и вентиляции, специалист в области влажностного режима ограждений зданий — гляциолог.

Известно, что Вячеслав Николаевич много подрабатывал на стороне, его работы свидетельствуют о хорошем знании теории тепло-

обмена. Одна из таких работ называлась «Расчет температуры нагрева железобетонной колонны цеха нагретыми слитками, установленными на железнодорожную платформу для последующей обработки на прокатном стане».

Но задача гляциолога более сложная. Снег и лед являются полупрозрачными телами. В отличие от обычных строительных материалов, в толще полупрозрачных материалов перенос теплоты происходит и теплопроводностью, и излучением. На тот момент времени уравнение процесса такой теплопередачи было составлено, но решения его еще не было. Надо быть смелым, уверенным в себе и образованным человеком, чтобы браться за такую работу.

Результаты работы в экспедиции были вполне успешными. По возвращении он занялся расчетами намерзания в течение многих миллионов лет ледников Антарктиды. Параллельно с преподаванием, Вячеслав Николаевич работал еще в одном НИИ, ему была выделена лаборантка, которая выполняла эти расчеты на гидроинтеграторе Лукьянова в учебной лаборатории кафедры отопления и вентиляции МИСИ. Выполненная работа была оценена как диссертация, достойная присуждения ученой степени доктора, но географических наук. Вячеслав Николаевич на то время уже руководил кафедрой отопления и вентиляции, и ученая степень доктора географических наук в этой его должности не смотрелась.

Пришлось работать над новой диссертацией, теплофизической. Были взяты аспиранты:

Титов В.П — фильтрация воздуха через ограждения;

Тертичник Е.И., Мишер А.М. — влажность;

Кувшинов Ю.Я., Малявина Е. Г., Лунин А., Мерешко, зав. лабораторией кафедры (жил на ул. Соломенной сторожки) и др. — тепловой режим.

Обобщением работ указанных учеников явились монография «Строительная теплофизика» и диссертационная работа. Монография была заявлена как учебник, хотя по сути была и есть оригинальным научным исследованием, содержащим ценный материал для научных и инженерных расчетов. Этим и объясняется ее актуальность, популярность и в наши дни. По прошествии многих лет ничего близкого и значимого в сравнении с работой Вячеслава Николаевича так и не появилось. Было и второе издание, более расширенное и полное. Эта работа — «на века».

* * *

Профессор кафедры Комплексной безопасности в строительстве ФГБОУ ВПО «МГСУ», доктор технических наук В.М. Ройтман

История с научным руководством неожиданного аспиранта

После окончания в 1959 г. факультета ПГС Московского института инженеров городского строительства (МИИГС), трех лет работы по распределению в коммунальном хозяйстве и года работы в проектном институте, автор этих строк все никак не мог определиться с окончательным выбором рода своих занятий.

Мой отец, Мирон Яковлевич Ройтман, один из ведущих специалистов в области пожарной профилактики в строительстве, предложил мне попробовать еще один вид деятельности — наука и даже подсказал тему будущей научной работы.

Он сказал, что в нормальных условиях эксплуатации характеристики теплопереноса строительных материалов обычно принимают в виде некоторых постоянных величин (констант); в широком же диапазоне температур, как, например, при прогреве конструкций в условиях пожара, эти характеристики могут существенно изменять свои значения; это может повлиять на точность расчетной оценки огнестойкости строительных конструкций. «Вот и попробуй изучить эти изменения», — сказал мне отец.

Не понимая толком, о чем идет речь, я сдал вступительные экзамены и поступил в аспирантуру МИСИ им. В.В. Куйбышева, на кафедру охраны труда.

Стал ходить в библиотеку. Прочитал, что такое характеристики теплопереноса и с помощью каких методов и устройств их определяют, но что делать дальше не понимал.

Встал вопрос о научном руководителе.

На кафедре охраны труда МИСИ специалистов в области высокотемпературной теплофизики не было. Поиски подходящего научного руководителя на других кафедрах также не увенчались успехом. Прошло полгода драгоценного аспирантского срока обучения. И вот в это время профессор Н.Д. Золотницкий, тогда заведовавший кафедрой охраны труда, вызывает к себе аспиранта В.М. Ройтмана и сообщает ему: «На кафедре отопления и вентиляции работает молодой талантливый специалист в области строительной теплофизики, доцент Богословский Вячеслав Николаевич. Он только что приехал из Антарктиды. Это — лучший вариант научного руководителя для вас. Идите к нему и поговорите!».

Вячеслав Николаевич Богословский, 1964 г.

Сказано — сделано. Я явился в комнату 104 на первом этаже здания МИСИ на Шлюзовой набережной, 8, на кафедру отопления и вентиляции. Спросил, могу ли я видеть Вячеслава Николаевича Богословского. Секретарь кафедры показывает — вот он, пошел в столовую обедать. Вижу молодого симпатичного доцента, догоняю его, представляюсь и прошу разрешения обсудить аспирантскую проблему. В.Н. Богословский, не останавливаясь, отвечает, что он меня слушает. И вот так, в коридоре, на бегу, среди толпы студентов, я говорю ему: «Я хочу просить вас, Вячеслав Николаевич, чтобы вы были моим научным руководителем!». Тут же в ответ получаю: «Почему я должен быть вашим руководителем? Может быть вы — дурак?».

Я встал, как вкопанный, а Богословский пошел дальше, в столовую. Но затем, придя в себя, будучи человеком самолюбивым и обидчивым, я дал себе зарок, что только этот человек, и никто другой, должен стать моим научным руководителем, чтобы я доказал ему, что он неправ.

Профессору Н.Д. Золотницкому пришлось потратить массу времени, дипломатических и недипломатических усилий, прежде чем уломали Вячеслава Николаевича Богословского быть научным руководителем этого, неведомого для него, аспиранта, с неведомой темой.

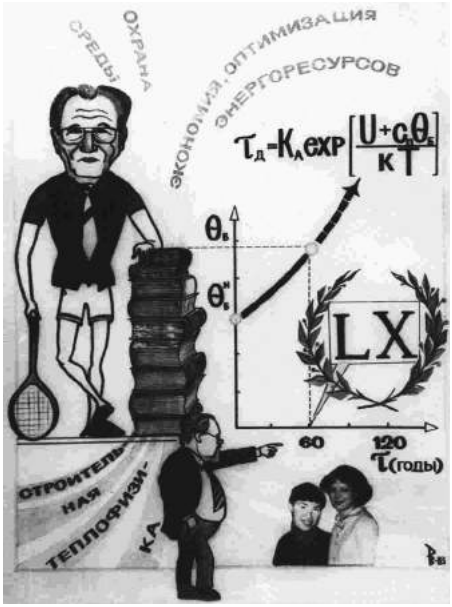
Позже я понял, что судьба подарила мне гениального Учителя.

Действительно, Вячеслав Николаевич Богословский (1923—2001 гг.) был одной из самых ярких фигур МИСИ в 60-х гг. XX столетия.

Светлая голова, азартный исследователь, замечательный педагог и руководитель, страстный спортсмен, действительный член Российской Академии архитектуры и строительных наук, профессор, доктор технических наук Вячеслав Николаевич Богословский в числе первых в МИСИ—МГСУ был удостоен звания почетного профессора МГСУ.

Эта судьбоносная встреча и стала для меня стартовым толчком для моих последующих «полетов» в науке.

Через много лет я отразил многогранность и талант своего учителя на картине, которую нарисовал и подарил В.Н. Богословскому на его 60-ти летнем юбилее.



Фотокопия картины, которую В.М. Ройтман нарисовал и подарил своему научному руководителю проф. Богословскому В.Н. на его 60-летний юбилей, 1983 г.

Неожиданное приобщение к ядерной науке: история с термометрами Бекмана

1964 г. Я, аспирант первого года обучения кафедры охраны труда МИСИ им. В.В. Куйбышева, стою в глубокой печали в коридоре первого этажа учебного здания МИСИ на Шлюзовой набережной, дом 8. Около меня находится ящик с металлическими деталями установки для определения значений коэффициента теплопроводности различных материалов в диапазоне температур до 1000 °С. На этой экспериментальной установке я должен получить данные для своей кандидатской диссертации об изменениях теплофизических характеристик строительных материалов в зависимости от температуры нагрева.

Моя печаль состояла в том, что мне негде было поставить свою экспериментальную установку. Ситуация безнадежная, так как все помещения здания на Шлюзовой были в то время перегружены до

предела учебным процессом, и для аспирантов места совершенно не оставалось. Этот ящик уже выкинули из всех лабораторий, куда он пытался «пристроиться». Что делать дальше — неизвестно.

Но происходит чудо! В это время мимо, тоже с печальным лицом, проходит заведующий учебной лабораторией кафедры «Строительства ядерных установок» (СЯУ). Мы были знакомы, и я спросил его почему он такой печальный.

Он отвечает, что у них «горит» очень важная научно-исследовательская работа по оценке значений коэффициентов теплопроводности новых защитных бетонов при различных температурах. Он обошел все организации, но никто не может помочь в этом деле. Что делать он не знает, а дело срочное!

Я ему говорю: «Мой дорогой! Ты видишь этот ящик с «железками»? Это детали установки, на которой можно определить то, что тебе нужно!».

Несчастного аспиранта тут же притащили на кафедру СЯУ и познакомили с заместителем заведующего кафедрой Виталием Борисовичем Дубровским. Виталий Борисович представил меня легендарному человеку — заведующему кафедрой СЯУ, заместителю министра обороны СССР, генералу армии, профессору Александру Николаевичу Комаровскому. В результате мне отвели часть отдельной комнаты учебной лаборатории кафедры СЯУ — тогда лучшей и самой современной лаборатории МИСИ.

Я очень быстро собрал свою установку. Начал пробные опыты. Пришлось преодолеть много трудностей, в том числе удалось найти нагреватели, позволяющие достигать температуру нагрева образцов до 1200 °С. Пора было получать научную информацию.

И тут оказалось, что эта установка не может работать без так называемых термометров Бекмана. Это специальные термометры для измерения очень маленьких перепадов температур, в несколько сотых долей градуса Цельсия. Я этих термометров никогда в глаза не видел и никто в институте не имел о них ни малейшего представления.

Дело встало! Доложили В.Б. Дубровскому, и он сказал, что дело серьезное и придется побеспокоить Александра Николаевича Комаровского.

В это время я уехал на неделю в командировку. Возвращаюсь, иду в лабораторию. Меня встречают друзья, тоже аспиранты, Павел Лавданский, Виталий Соловьев, Валя Гетманов, Борис Пергамен-

щик (все теперь — профессора МГСУ), хватают, тащат к телефону с криками: «Ты где шляешься? Тут вся Москва ищет твои термометры Бекмана! Звони немедленно в Академию химзащиты!».

Звоню в эту академию. Отвечает полковник такой-то. Я представляюсь и слышу в ответ отчаянный крик: «Что вы со мной делаете! Немедленно приезжайте и забирайте ваши чертовы термометры. Я должен был еще три дня назад доложить заместителю министра обороны о выполнении его поручения!».

Так закончилась эта история с термометрами Бекмана. Но она имела продолжение.

Термометры были установлены в положенных местах установки. Были получены ценные данные о теплопроводности новых типов защитных бетонов в требуемом диапазоне температур. Отчет об этой работе был сдан в срок и принят заказчиком. По результатам работы был опубликован ряд статей. В 1967 г. я защитил кандидатскую диссертацию. Продолжение исследований привело к возникновению нескольких новых научных направлений, в том числе: «Методы и средства теплофизической диагностики», «Механизм процессов тепло- и влагопереноса в капиллярно-пористых телах при высокотемпературном нагреве», «Оценка огнестойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях». Об этом было опубликовано несколько интересных статей:

1. *Богословский В.Н., Ройтман В.М.* Теплообмен в интенсивно прогреваемых конструкциях. В кн.: Тепломассообмен в капиллярнопористых телах. Минск: РИО ИТМО АН БССР. Т. 5. 1976. С. 142—146.

2. *Bogoslovskiy W.N., Roitman W.M.* Bestimmung der warmephysikalischen Characteristiken von Baustoffen fur die Berechnungen des Feuerwiderstandes. Bautechnischen Brandschutz: Aus Forschung und Praxis, 7. Berlin: Staatsverlag der DDR, 1978. S. 97—113.

3. *Bogoslovskiy W.N. , Roitman W.M.* Explosionsartige zerstorung von Beton. Bautechnischen Brandschutz: Aus Forschung und Praxis, 7. Berlin: Staatsverlag der DDR, 1978. S. 148—157.

4. *Богословский В.Н., Ройтман В.М.* Теплофизическая диагностика состояния и поведения строительных материалов, испытывающих высокотемпературное воздействие // В кн.: Тепломассообмен-1У. Методы экспериментальных исследований. Тезисы докл. 6-ой Всесоюзн. конф. по тепломассообмену. Киев: Наукова думка, 1980. С. 151—158.

5. *Богословский В.Н., Ройтман В.М., Парфентьева Н.А.* О возможностях прогноза долговечности строительных материалов и конструкций на основе кинетического подхода // Строительство и архитектура. № 9. 1982. С. 62—68.

6. *Богословский В.Н., Ройтман В.М.* Огнестойкость конструкций зданий с учетом режима пожара. Строительная механика и расчет сооружений. № 4 (154). 1984. С. 4—7.

В 1987 г. я, под руководством В.Н. Богословского, подготовил и защитил докторскую диссертацию и в 1991 г. стал профессором нашего замечательного университета.

* * *

Профессор кафедры физики,
кандидат физико-математических наук Н.А. Парфентьева

Неожиданно для себя около 30 лет назад я оказалась в МИСИ. До этого я работала в АН СССР и в МГУ им. Ломоносова, поэтому я считала, что здесь я задержусь недолго.

Занятие наукой было для меня естественным состоянием, моей научной темой была теория тепломассопереноса, поэтому вполне логично, что я пришла на кафедру отопления и вентиляции и предложила использовать то, что я умею, для решения задач строительной теплофизики.

Именно это удержало меня в институте и удерживает до сих пор.

Первым человеком, с которым я разговаривала, был заведующий кафедрой, немолодой, но весьма активный энергичный господин В.Н. Богословский, вполне доброжелательный, но куда-то очень спешащий. Он меня направил к доценту кафедры В.П. Титову, сказав, что для меня будет «здорово» работать вместе с ним.

И действительно, мы долгие годы работали вместе с Титовым, у нас были общие аспиранты, при этом каждый трудился на своем поле: В.П. Титов — прекрасный инженер, бесконечно увлеченный своей специальностью, я же довольно хорошо моделировала процессы и решала уравнения.

Богословского я видела только на научных семинарах, меня он поражал своей эрудицией, быстротой реакции, умением видеть работу в целом и извлекать из мутного для меня доклада суть проблемы. Пожалуй, если бы не он, я бы надорвалась на попытках понять смысл работ и вообще, почему чисто инженерную работу представляют как научную, в чем оригинальная научная идея.

Еще мне запомнился семинар, на котором он делился своими впечатлениями после поездки в Америку. Тогда еще было абсолютно советское время, традиционным врагом, из-за которого у нас все не клеится, как всегда, были США. Меня тогда удивила его внутренняя свобода, он не скрывал восторга от этой страны, рассказывая не только о том, что ему интересно в рамках профессии, но и об огромных парках в центре Нью Йорка, об архитектуре городов, о другом уровне градостроительной цивилизации.

Мы с ним стали чаще общаться, когда он меня попросил помочь своей аспирантке из Литвы, так как у нее очень интересная работа, требующая решения некоторых уравнений математической физики, «которые вы так любите», что, кстати, было чистейшей правдой. Каждая встреча по работе с ним была очень короткой, но всегда полезной.

Я редко встречала людей, которые так умели наслаждаться жизнью, каждой новой жизненной ситуацией. Помимо работы он играл в теннис, ходил на лыжах, легко впитывал все новое и интересное, не был категоричен. Практически никогда он не жаловался на здоровье, не сообщал всем, как он себя чувствует, а это тема большинства пожилых людей. Вячеслав Николаевич говорил о людях, в основном, хорошо, что было приятно и не требовало напряжения при общении с ним.

Как-то Богословский пришел ко мне на лекцию по теоретической гидромеханике, темой лекции были конформные отображения. Казалось, что это отнюдь не его тема, тем не менее, он после лекции, восхитившись моей «ученостью», набросал кучу примеров, где эту теорию можно применить на практике.

Я запомнила одну очень важную встречу с Вячеславом Николаевичем У нас на кафедре появился бодрый молодой человек, который сказал, что материал у него есть, и он хочет защитить диссертацию, только нужно найти применение его результатов в строительстве. Я придумала, как это можно сделать, и он защитился. К моменту защиты он был уже партийным лидером института. К моему несчастью, он оказался благодарным человеком и предложил мне вступить в КПСС. Я сказала, что не считаю себя достойной такой чести, но как-то, когда я, лежа на диване, читала, он мне позвонил и сказал, что завтра я прохожу партгруппу факультета, а послезавтра меня уже примет в кандидаты в члены партии райком. На мое возражение, что я даже устава партии не знаю, он

сказал, что это все неважно. Я не спала всю ночь, придумывая варианты, как мне избежать этого «счастья». На следующее утро я встала и увидела, что у меня кровоизлияния в обоих глазах. Я пошла в институт, проклиная свою благотворительность. Одним из первых я увидела Вячеслава Николаевича, который спросил, что со мной. «Я в партию вступаю». Он меня пригласил в кабинет и долго утешал, сказав, что сейчас партия перестраивается и это отнюдь не позор быть членом партии, и вообще жизнь прекрасна и не надо ко всему относиться трагически, в общем, я от него вышла невероятно вдохновленная и готовая к великим свершениям даже в рядах партии. К счастью, меня не пустил в партию секретарь партгруппы нашей кафедры, он сказал, что нельзя нарушать устав, сначала они должны рассмотреть мою кандидатуру на партгруппе, я радостно с ним согласилась, все застряло, а потом и забылось. Вот это умение сказать человеку нужные слова, вдохновить его было одна из черт Вячеслава Николаевича.

Как любой лидер, он вызывал разные чувства у людей, но всегда было ясно, что он главный, вокруг него все вращалось, заводилось, работало.

На его 60-летний юбилей я прочитала ему следующее поздравление:

Слыхали ль Вы? Слыхали ль Вы?
Про шефа ходит слух по миру —
От Вашингтона до Москвы
И от Парижа до Памира.
Мы засмеялись лишь в ответ.
Готовы мы скорей поверить,
Что отопленья в доме нет,
Что на Таганку есть билет,
Но невозможно нас уверить,
Что шефу шесть десятков лет.
Но, если правду нам сказали,
То, Господи, даруй и нам,
Тем, кто сидит сегодня в зале
Вот так летать по этажам,
Произносить такие речи,
Так дамские сердца пленять,
На конференции, как ветер,
Из Киева в Иркутск летать.

Профессор Богословский влажность
Глубоким смыслом пропитал,
И влажности придал он важность,
Придумав ей потенциал.
Мы, как из клетки материнской,
Из Ваших выросли идей.
Вы кафедре как Папа Римский,
Вы здесь и Маг, и Чародей.
Вот Вы стоите величаво
С благоволением в очах.
Мы любим Вас, Вы наша СЛАВА,
Мы в Ваших греемся лучах.
Для Вас сияют все улыбки,
Но все нам чудится опять,
Что где-то вкралась здесь ошибка
И Вам сегодня 35.

* * *

Доцент, кандидат технических наук Сабина Паулаускайте
(Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса)

На всю жизнь остались теплые воспоминания о В.Н. Богословском как о необыкновенном человеке. Мне посчастливилось быть его аспиранткой и старостой аспирантов в 1978—1981 гг., поэтому пришлось, наверное, с ним больше общаться, чем моим коллегам, другим аспирантам. Мы восхищались им как великим ученым, прекрасным педагогом и руководителем (в те годы он заведовал кафедрой отопления и вентиляции). С другой стороны Вячеслав Николаевич был очень теплой, понимающей, всем интересующейся личностью. В нем аспиранты видели не только учителя, но и друга, а иногда и отца.

Помнятся научные аспирантские семинары, проводимые на кафедре, когда выступающие не совсем четко и ясно представляли решаемую задачу, но стоило выступить Вячеславу Николаевичу, как все становилось на свои места, были найдены все «изюминки» и недостатки. Поначалу всем его аспирантам было нелегко, ставилась задача, получали подсказки, где что примерно искать, но надо было «выплывать» самим. Зато по завершению диссертации Вячеслав

Николаевич всем уделял много внимания, при своей занятости всегда находил время обсудить результаты работы.

Вячеслав Николаевич никогда не отказывался принять участие в мероприятиях, которые организовывали аспиранты, приехавшие из разных стран, республик и городов. Традицией у аспирантов было раз в год идти фотографироваться и потом всем пообедать. На эти мероприятия приглашали вначале одного заведующего кафедрой — Вячеслава Николаевича, потом и всех руководителей аспирантов. В памяти осталось посвящение в аспиранты молодых новых коллег, проводы друзей, закончивших аспирантуру, обеды по воскресениям — блюда национальной кухни (узбекский плов, сибирские пельмени, литовские цепеллины, польский бигос, вьетнамский салат). Всегда интересно было с ним беседовать и особенно его слушать.

Вячеслав Николаевич посетил, наверное, все города, откуда приезжали аспиранты. Последняя моя встреча с ним была в Вильнюсе на международной конференции нашего университета в сентябре 2000 г.

Теперь в каждый приезд в Москву на конференцию «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» в МГСУ мы — бывшие аспиранты — посещаем могилу Вячеслава Николаевича на Новодевичьем кладбище, вспоминаем, каким он был всегда жизнелюбивым, с неиссякаемой энергией, полным оптимизма. Вячеслав Николаевич навсегда остался в нашей памяти и в сердцах.

* * *

Старший научный сотрудник,
кандидат технических наук Н.Г. Волкова,
инженер Ю.К. Попова, НИИСФ РААСН

Вячеслав Николаевич, несмотря на пережитые ужасы войны, потерю близких, тяжелые травмы, полученные в Антарктиде и в автокатастрофе, оставался романтиком с артистической душой, для которого «жизнь была прекрасна во всех ее проявлениях». Возможно, это была благодарность провидению, сохранившему ему и старшему брату Николаю Николаевичу жизнь на фронтах Великой Отечественной войны. Работа во второй Антарктической экспедиции, общение с крупными учеными, глобальность исследований повлияли на восприятие ценности жизни.

Авторитет Вячеслава Николаевича, руководителя, педагога, личности был весьма высок, его ценили, любили, перед ним прекло-

нялись. Судьба подарила нам общение с Вячеславом Николаевичем в последние годы его жизни, на протяжении которых мы работали с ним. Наши ранние воспоминания относятся к разным годам жизни Вячеслава Николаевича, поэтому мы нашли уместным воспоминания представлять по отдельности и совместно. Юлия Константиновна познакомилась с ним в более ранний период его деятельности.

Ю.К. Попова. В 1965 г. я поступила в аспирантуру НИИСФ Госстроя, в лабораторию натурных исследований. Заведовал лабораторией Гаий Иванович Константинов, участник Сталинградской битвы. Он с любовью и уважением относился к Вячеславу Николаевичу, ученому и фронтовику. Лаборатория Г.И. Константинова несколько лет вела натурные наблюдения в жилых домах типовых серий для средней Азии. В этих исследованиях, кроме специалистов лаборатории, ответственным исполнителем темы была кандидат технических наук Л.Н. Лобанова. Наряду с сотрудниками института в работе принимала участие аспирантка кафедры отопления и вентиляции МИСИ Елена Георгиевна Малявина (Е.Г. Гречушникова). Вячеслав Николаевич участвовал в разработке темы и оценке результатов исследований теплового режима жилых домов.

В НИИ строительной физики, в лаборатории тепломассообмена Павла Матвеевича Брдлика регулярно проводились семинары под руководством Виктора Кирилловича Федорова. Постоянными участниками семинаров были Вячеслав Николаевич, Владимир Павлович Титов и другие сотрудники кафедры МИСИ. В лаборатории долговечности ограждающих конструкций НИИСФ влажностным режимом занимался кандидат технических наук А.М. Микшер, в прошлом аспирант В.Н. Богословского.

В первую аспирантскую весну я оказалась на конференции в МИСИ. Вячеслав Николаевич выступал блестяще, оставляя неизгладимое впечатление. Тема доклада была интересна, значима и актуальна. Все последующие годы я стремилась посещать конференции, проводимые кафедрой отопления и вентиляции МИСИ.

Защита В.Н. Богословским докторской диссертации «Тепловой режим зданий» в 1970 г. длилась несколько часов и была воспринята как профессиональный праздник — так разносторонне интересно и глобально была представлена эта научная работа. Зал старого МИСИ на Шлюзовой был переполнен.

Н.Г. Волкова. Искреннее уважение к Вячеславу Николаевичу сформировалось у меня в далекие 70-е гг. XX в. Я работала препо-

давателем кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Хабаровского политехнического института. Достаточно теплые отношения поддерживались с преподавателями и коллегами Московского инженерно-строительного института, кафедры отопления и вентиляции. Вячеслав Николаевич был общим кумиром. Его книги «Строительная теплофизика» и «Тепловой режим здания» были нашей настольной литературой.

Хабаровчане, работавшие на кафедре ТГВ, ездили на стажировки, повышали квалификацию преподавателей (ФПК), обучались в аспирантуре при московской кафедре. Это В.Г. Лельков, А.А. Языков, В.В. Мальцев, В.Г. Конопацкий, Н.Т. Мельник и др. Они с большим уважением и восхищением говорили о специалистах кафедры отопления и вентиляции МИСИ. Чаще других звучали фамилии В.П. Титова, А.Н. Сканави, Е.Г. Малявиной. Особенно запоминались и радовали приезды с чтением лекций В.П. Титова и А.Н. Сканави. Вячеслав Николаевич в это время читал лекции в Америке, в Японии. Его высоко ценили и у нас, и за рубежом.

В 1980 г. я поступила в аспирантуру НИИ строительной физики при Госстрое СССР. Вячеслав Николаевич был наиболее уважаемым членом Ученого Совета нашего института. В 1987 г. я защитила диссертацию. Вскоре наступили лихие девяностые годы. В это время мы с Юлией Константиновной оказались в одной лаборатории.

Совместные воспоминания. В 90-е гг. XX в. были ликвидированы и отданы в частные руки крупнейшие научно-исследовательские институты строительной отрасли. Но в это же время была восстановлена Российская академия архитектуры и строительных наук. Вячеслав Николаевич стал одним из первых ее действительных членов. НИИСФ, при участии академиков Георгия Львовича Осипова и Вячеслава Николаевича Богословского, остался государственным учреждением в РААСН.

В те годы в доме архитекторов и Академии РААСН проводились академические чтения. Вячеслав Николаевич приглашал нас на эти мини-конференции. В докладах и дискуссиях поднимались актуальные вопросы строительства и эксплуатации зданий.

НИИСФ в течение ряда лет проводил научно-практические конференции, издавались сборники статей. Непосредственную подготовку и редактирование осуществляли В.Г. Гагарин и И.В. Бессонов во главе с В.Н. Богословским.

Н.Г. Волкова. Мне в некотором роде повезло, Вениамин Иванович Лукьянов пригласил меня для работы над темой «Разработка

предпроектных рекомендаций по соблюдению заданного влажностного режима в подполье и интерьерах Останкинского дворца». В мои задачи входили проектирование и расчет систем вентиляции. Вениамин Иванович тогда работал с Вячеславом Николаевичем, что поспособствовало нашему дальнейшему сотрудничеству с В.Н. Богословским. Я была подключена к работе по теме: «Разработка теории оптимизации систем жизнеобеспечения жилых и общественных зданий...», которой руководил В.Н. Богословский. Это была комплексная и интересная тема. К сожалению, Вениамин Иванович вскоре умер.

Совместные воспоминания. Вячеслав Николаевич нуждался в помощниках от нашего института, и мы стали с ним сотрудничать. Для нас это была большая честь. Стечение многих обстоятельств поспособствовало плодотворной и творческой работе. Специфика внутри рабочего коллектива состояла в солидарности, уважении, взаимном доверии и поддержке. Отношения были дружеские. Сначала мы помогали Вячеславу Николаевичу в решении общих вопросов, написании отзывов, содействовали поддержанию многочисленных отечественных и зарубежных связей. Работа принимала все более творческий характер.

Вячеслав Николаевич был председателем теплофизической секции НИИСФ, Юлия Константиновна — ее ученым секретарем. Заседания секции проходили интересно. В.Н. Богословский старался поддержать диссертанта, докладчика тематического отчета. Обладая энциклопедическими знаниями, он способствовал созданию благоприятной обстановки, акцентировал внимание на положительных сторонах работы.

Лаборатории, входящие в теплофизическое отделение, отмечали общие праздники. Вячеслав Николаевич присутствовал на наших застольях. Он был тамадой, интересно рассказывал, замечательно пел — у него был красивый поставленный голос.

В то время, так же как и сейчас, остро стаял вопрос энергосбережения. Вячеслав Николаевич руководил большой работой по теме: «Технология оптимизации энергии вновь возводимых и реконструируемых зданий». По результатам исследований была предложена научно-техническая концепция создания современного экологически чистого экономичного здания с эффективным использованием энергии (ЗЭИЭ) и разработан алгоритм общей методики создания здания как единой энергоаэродинамической системы. В этой работе участвовали лучшие научные кадры — специ-

алисты в области строительства и инженерных систем обеспечения микроклимата помещений. Были привлечены специалисты родственных организаций, в том числе и из других городов.

О масштабах этой работы можно судить по профессионализму участвующих в работе специалистов: А.М. Авакумов, В.К. Аверьянов, И.В. Бессонов, С.Г. Булкин, А.А. Верховский, Н.Г. Волкова (Н.Г. Катомина), Ю.Г. Грачев, А.В. Гришкова, Е.Х. Китайцева, И.Я. Киселев, Г.К. Климова, Б.М. Красовский, В.К. Лицкевич, Е.Г. Малявина, Ю.А. Матросов, А.А. Плотников, В. Покотилов, Ю.К. Попова, В.К. Савин, О.Д. Самарин, В.Р. Хлевчук, Д.Ю. Хромец, Ф.Х. Шафеева, В.Ю. Ясин, Ю.Д. Ясин. Близкие контакты у Вячеслава Николаевича были с Б.А. Крупновым, Я.Г. Кронфельдом.

Истинный ученый и педагог Вячеслав Николаевич всегда вдохновлял на работу, даже самую прозаичную. Предполагалось дальнейшее проведение исследований над концепцией создания современного экологически чистого экономичного здания с эффективным использованием энергии (ЗЭИЭ), но смерть Вячеслава Николаевича прервала эту работу.

Деятельность в НИИСФ не ограничивалась рамками одной работы, так, творческая мастерская акад. РААСН В.Н. Богословского «Системы кондиционирования микроклимата» проводила работу по мониторингу тепловлажностного и воздушного режима здания, возводимого югославской фирмой «Прогресс», генеральным директором которой был Р. Батинич, главным инженером — Т. Илич. Сотрудниками мастерской были В.Р. Хлевчук, Н.Г. Волкова, О.Д. Самарин, Ю.К. Попова.

В октябре 1997 г. под руководством В.Н. Богословского Фам Куок Куан защитил свою диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук «Развитие теории эффективности систем кондиционирования микроклимата здания и ее применение в промышленной вентиляции, обеспечивающей условия труда и защиты воздушного бассейна в условиях Вьетнама». Актуальность исследований была определена необходимостью разработки научной концепции формирования экостратегии Вьетнама.

На этот же период времени пришлась работа над кандидатской диссертацией Самарина Олега Дмитриевича «Оптимизация мощности параметров управления систем кондиционирования микроклимата в условиях переменных нагрузок», которая была защищена в 1999 г. в МГСУ. В конце 2012 г. им была подготовлена докторская диссертация «Оптимизация комплекса энергосберегающих

технических решений и теплотехнической безопасности при проектировании зданий».

Вячеслав Николаевич активно работал, опекал студентов, проводил академические чтения по тепловому режиму зданий и энергосбережению, работал над публикациями. В зимние каникулы 2001 г. Вячеслав Николаевич поехал в Подмосковный дом отдыха, где катался на лыжах и застудил легкие. В академической больнице шел ремонт. Он оказался в обычной, где назначили противопоказанные ему антибиотики. Реанимации предшествовали мучительные дни, наступало некоторое улучшение. Ему стало лучше, но израненные в Великую Отечественную войну легкие погубила тромбоэмболия. 23 февраля в 7 часов утра оборвалась жизнь необыкновенно талантливого, человека. Он говорил, что хотел бы «умереть в полете».

Отпевали Вячеслава Николаевича в храме Адриана и Наталии, расположенного недалеко от МГСУ. Гражданская панихида прошла на 1-м этаже высотного здания института. Была нескончаемая процессия людей, которые пришли проститься с замечательным Человеком, Учителем, Академиком. Похороны состоялось на Новодевичьем кладбище, рядом с захоронением отца, Н.Н. Богословского, проф. МИСИ.

Ю.К. Попова. Моя встреча с Вячеславом Николаевичем перед отъездом в дом отдыха была в метро на станции «Фрунзенская», он передавал рукопись книги «Потенциал влажности». Сидели на скамейке недалеко от бюста М.В. Фрунзе, В.Н. Богословский часто смотрел на этот бюст. В связи с этим после смерти Вячеслава Николаевича у меня возникла мысль установить ему памятник.

Помог ее реализовать наш сотрудник И.В. Бессонов, работавший ранее с заслуженным скульптором Яковом Николаевичем Купреяновым, который был уже серьезно болен и поручил ваяние бюста В.Н. Богословского своему любимому и талантливому ученику Мише Соломатину. Так, в бывшей полуподвальной мастерской И. Левитана на «Чистых прудах» был выполнен этот памятник. В процессе работы в мастерскую приезжала дочь Богословского Ирина Вячеславовна с мужем Константином Всеволодовичем Григоровичем, Владимир Миронович Ройтман и я.

Совместные воспоминания. На памятнике высечена надпись «От родных, коллег и друзей». Деньги собирали всем миром — дирекция и теплофизики НИИСФ, кафедра МГСУ, знакомые и любящие Вячеслава Николаевича люди.

На открытии памятника было многолюдно, приехали даже бывшие ученики из других городов. Дочь, Ирина Вячеславовна, пригласила баяниста, который наигрывал мелодию «Землянки», любимой песни Вячеслава Николаевича. С этой песней у Богословского были связаны военные воспоминания: его рота должна была преодолеть поле, заминированное немцами. Идти на верную смерть страшно, но и отступать нельзя. Он, командир роты, в 4 часа утра 1943 г., в полумгле, запевает «Землянку», и бойцы прорываются.

Теплофизик и замечательный фотохудожник Щербак Николай Николаевич запечатлел открытие памятника, на котором присутствовали родные, друзья, бывшие однокурсники, коллеги по специальности — москвичи и приехавшие из других городов, участники Антарктической экспедиции.

Скорбь, боль и горечь утраты великого замечательного человека, Богословского Вячеслава Николаевича выражена в стихах Сергея Сергеевича Лопатина, его друга по Антарктиде.

23 февраля, в день смерти, 30 мая — в день рождения или 13 октября — день крещения Вячеслава Николаевича (именины), родные, коллеги и друзья посещают его могилу. Недалеко захоронен соавтор памятника Купреянов Яков Николаевич.

* * *

Вице-президент НП «АВОК» Е.О. Шилькрот

Мне посчастливилось начать работать около него, еще будучи студентом (сказать «вместе с ним» или «у него» было бы неверным по существу). И это совершенно незабываемые минуты, реже — часы, которые давали знаний и понимания намного больше, чем чтение любого учебника или слушание лекции, когда он сажал меня рядом и начинал мне рассказывать вещи, о которых я не имел понятия. В.Н. Богословскому, по-видимому, было интересно, когда «незамутненная», «свежая» голова (так теперь говорят по телевидению) задает совершенно «идиотские» вопросы. Вероятно, ему становилось более ясно, на что надо обратить внимание, чтобы материал стал более доступным и более простым в понимании.

Вячеслав Николаевич практически никогда не разжевывал задачу, которую он ставил перед учеником, часто он сам не знал решения. Он подсказывал путь поиска, литературу, где можно посмотреть аналогичные вопросы, но всегда был готов обсудить ре-

зультаты. В.Н. Богословский обладал поразительной интуицией, он видел слабые места сразу, даже в вопросах, которыми он сам прежде не занимался. Это особенно хорошо было видно на защитах диссертаций, когда он моментально схватывал «болевую точку» практически любой работы.

Вячеслав Николаевич был чрезвычайно яркой личностью. Это его качество проявлялось в науке, педагогике, в общении с друзьями, в любом застолье — заводной, раскованный, любитель всяческих компаний — с ним всегда было интересно.

* * *

Титов Владимир Павлович

Стихи 1970—1980-х гг.

Ты самый уверенный,
Ты самый умеренный,
Ты самый красивый
Из наших доцентов.
Тебе факультет
Самый сложный доверили.
И ты преуспел в нем
На 200 процентов.

* * *

Всегда ты знал, чего хотел,
В боях и в жизни не робел.
Врага побить, живым остаться,
К вершинам знания добраться.
Очаг создать, дочь воспитать,
И внуков с нежностью желать.
Всего достиг, к чему стремился
Чего искал, того добился.
Лишь делать внуков дед не может,
Ни ум, ни чин тут не поможет.
Приветы шлем и поздравленья!
Уже не первый юбилей.
Ты нас благодаришь, но все же
Хотя б по стопочке налей.

* * *

В манере искренней, неброской,
Наметив четкие пути,
Сказал профессор Богословский,
Что делать нам, куда идти.
В науке все мы пилигримы,
Нас жарит солнце, мочит дождь.
Создать в жилище микроклимат
Призвал нас наш научный вождь.
Доклад был четким и логичным,
А галстук — модным и столичным.
(Пардон, за галстуком он ездил
В хороший, добрый город Дрезден).

* * *

Ф.П. Щепилов

В 1956 г. я работал в Институте мерзлотоведения Академии наук СССР. Петр Александрович Шумский формировал гляциологический отряд Второй антарктической экспедиции и предложил мне принять в ней участие, для чего направил меня в МИСИ на кафедру ТГВ, где я и познакомился с Вячеславом Николаевичем Богословским, который возглавил теплофизическую группу. И мы стали интенсивно готовиться. В.Н. Богословский мне сразу понравился своей вежливостью и деловитостью. Все лето пришлось мотаться по заводам и разным учреждениям, доставать приборы и оборудование. Вячеслав Николаевич вникал во все дела, и я многому у него научился. Мне многое пришлось делать самому. Все перечислить невозможно. Вячеслав Николаевич первый (и последний) включил в программу расчет теплового баланса Антарктиды с помощью гидроинтегратора и сам поехал на Рязанский завод счетных машин и договорился об изготовлении уменьшенной по высоте стойки интегратора. Впоследствии, в Мирном, при распаковке мы обнаруживали в ящиках вкладыши с пожеланиями здоровья и успехов. Пустячок, а приятно.

В нашу группу был включен ленинградец, старый полярник Михаил Артемович Кузнецов с большим опытом работы в Арктике. Очень хороший человек и специалист, так что группа теплофизиков укомплектовалась. Михаил Артемович, весьма остроумный человек, дал нам название «хладофизики».

Вышли мы в Антарктиду из Калининграда на теплоходе «Кооперация» под командованием капитана Янцелевича. Путь предстоял длинный и долгий: Атлантика, Кейптаун, «ревущие сороковые» и шестой континент. В плавании мы без дела не сидели — отлаживали приборы, тарировали термометры и прочее.

В Мирном сразу включились в работу, хотя первое время жили в палатках. А зима уже давала о себе знать. Иногда приходилось откапывать друг друга. И в таких условиях Вячеслав Николаевич показывал себя общительным, веселым и очень дружелюбным. За время зимовки во Второй КАЭ у меня был полный контакт и понимание в работе с Вячеславом Николаевичем. И после зимовки наши связи не прервались, а прошло 45 лет! Я прошел еще 5 зимовок (2, 6, 9, 12, 16, 20), и возвращаясь после зимовки, первое, что я делал, это встречался с Вячеславом Николаевичем!

* * *

С.С.Лопатин, ВНИИГеофизика,
г. Москва (2001 г.)

Волею судеб я прожил немалую жизнь, а занимая ее поисками нефти и газа, побывал во многих местах СССР. При этом довелось мне встречаться со многими интересными людьми. Так вот, должен сказать, что Вячеслав Николаевич Богословский принадлежит к числу наиболее ярких личностей.

Я работал с ним в гляциологическом отряде Второй комплексной антарктической экспедиции (КАЭ) в 1956—1958 гг., а потом общался на различных встречах, включая и наши традиционные в доме нашего коллеги О.К. Кондратьева.

В КАЭ наша группа занималась определением толщины ледяного покрова, а Вячеслав Николаевич — теплофизическими исследованиями. Поэтому я могу говорить о нем как о личности.

Это был и внешне и внутренне красивый человек, подкупавший добротой и умом, веселостью и чуткостью, скромностью и порядочностью.

За 45-летнее знакомство я ни разу не слышал от Вячеслава Николаевича осуждающего кого-нибудь слова или раздраженного тона в разговоре.

Во время зимовки этот обаятельный человек был любимцем нашего отряда, включая ученого-гляциолога П.А. Шумского (1915—

1988 гг.). Здесь надо заметить, что наличие таких, как Вячеслав Николаевич, людей в эспедиционных, порою экстремальных условиях (и по моему опыту, и по опыту других) является подарком судьбы, ибо оно, подобно катализатору, способствует созданию атмосферы доброты и дружбы и позволяет легче переносить невольные моральные и физические тяготы, скрашивая и полярные ночи, и вой пурги, и разлуку с родными, и бытовые трудности, вливая в окружающих и бодрость и силу.

Недаром выдающийся полярник, многолетний руководитель американских экспедиций в Антарктиде Ричард Бэрд сказал, что «без таких людей мы превратились бы в нервные развалины». При ежегодных декабрьских встречах у О.К. Кондратьева в мою задачу входило оповещение товарищей о сборе. Так вот, Вячеславу Николаевичу я всегда напоминал, что на него возлагается задача привезти и отвезти его старшего друга немощного профессора С.С. Вялова (1913—1998 гг.), что он исполнял неукоснительно. Обычно в середине встречи Вячеслав Николаевич начинал «хулиганить». Он садился за пианино и звонким голосом запевал хулиганские песни: «Эй, Жора, подержи мой макинтош!» и «Зануда Сонька, что ты задаешься!». А потом затягивал наши «Антарктический вальс» и «Хочу сказать тебе, мой друг», которые мы дружно подхватывали, невольно, как бы возвращаясь в неповторимые дни нашей молодости.

Невольно вспоминаю, как многолюдно, шумно и весело отмечалось 70-летие Вячеслава Николаевича 30 мая 1993 г. Сколько было сказано в его адрес слов любви и уважения, а он, молодой и красивый, скромно улыбался, целовался с друзьями, благодарил. И все это происходило в теплой, радостной атмосфере искреннего почитания этого замечательного человека.

На 70 лет Вячеслава Николаевича Богословского (30.05.1993 г.).

Как ярок облик юбиляра!
Чтоб описать его портрет,
В моей палитре красок нет,
Нет поэтического дара.
А потому, слагая стих.
Уверен буду априори,
(А в том печаль моя и горе),
Даю фрагмент его иль штрих
Во всем он ярок и красив:
В делах, на отдыхе и службе,

В любви, застолье, спорте, дружбе.
Как полюбившийся мотив,
Как ветра он глоток бодрящий,
Как ледохода шум и звон
Все это в нем, все это он
Земной, азартный, жизнь любящий.
Как ширь небесного потока,
Размахом дел своих хорош,
В нем есть краса поэта Блока,
Он на Есенина похож.
От незабвенного Сережи
Такая ж удаль и размах.
В поступках, замыслах, делах
Кумир такой же молодежи.
Любимец дам, друзей напарник
Веселый, умный, молодой
Войны Великой он герой
И Антарктический полярник,
В науке многого достиг.
Решая мудрые проблемы,
Сей не рискнув коснуться темы,
Я тостом завершаю стих:
Прими сердечный наш привет.
И мы еще добавим Славе:
Будь добр, здоров, в веселом нраве
Живи счастливо много лет!

На встрече 9 декабря 2000 г. Вячеслава Николаевича не было с нами, так как он лежал в больнице. А вскоре где-то в конце второй декады декабря, случайно мы с ним встретились в поликлинике у Киевского вокзала. Я рассказал ему о встрече, расспросил о здоровье («по возрасту и старым болячкам») и со словами «какие наши годы, бог даст еще встретимся», мы, обнявшись, и расстались. Это была моя последняя встреча с Вячеславом Николаевичем, поистине необыкновенным, чудесным человеком.

Светлой памяти Вячеслава Николаевича Богословского
30.05.1923—23.02.2001

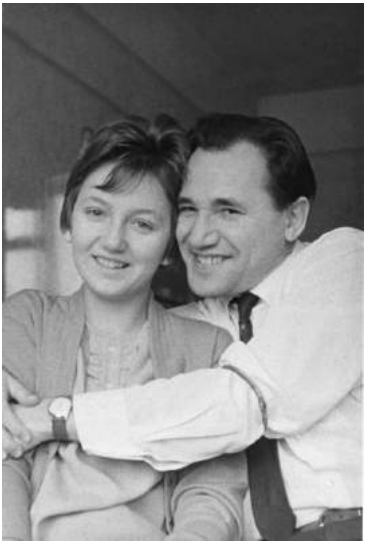
О злая весть, души отрава!
Принять то сердцем не могу,
Что умер Богословский Слава

И вижу Славу я в гробу!
У гроба лентой обрамленья
Друзей застывшая толпа
В тиши печального мгновенья
Звучат прощальные слова
И мне сказать пора приспела.
Я, горечь чувств в комок собрав,
Скажу: «Россия оскудела,
Такого сына потеряв!
Пройдут февральские метели,
В свои права войдет весна.
Мы ж без тебя осиротели,
Души оборвалась струна!»
И я реку, собравшись с духом
В момент прощания с тобой:
«Земля тебе пусть будет пухом,
И обретет душа покой!»

ФОТОГРАФИИ

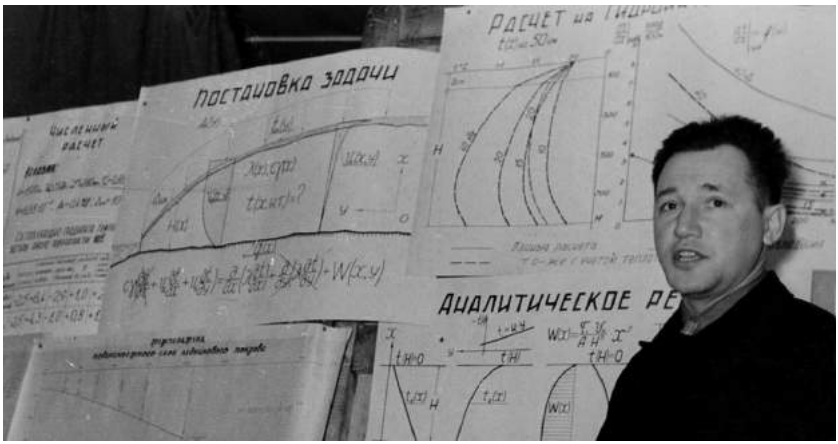
Николай Николаевич Богословский с женой Марией Евгеньевной
и сыновьями Вячеславом и Николаем

В.Н. Богословский с дочерью Ириной

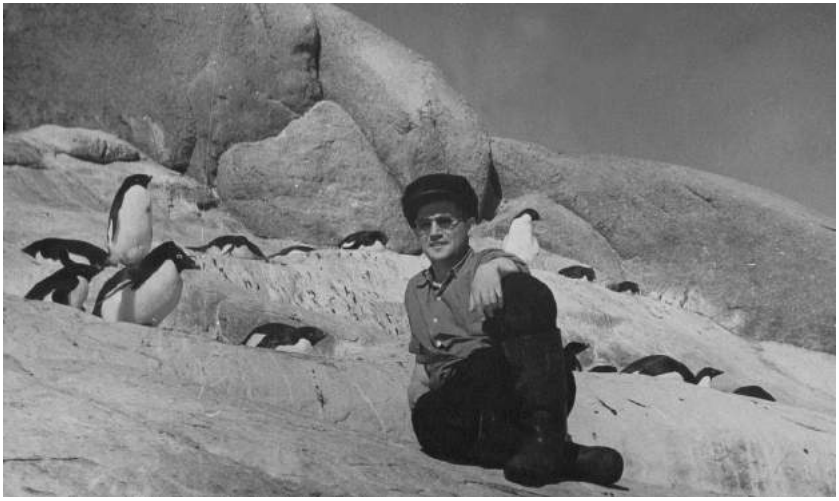


В.Н. Богословский с дочерью Ириной

В.Н. Богословский с дочерью Ириной



доклад В.Н. Богословского (конец 1950-х гг.)



В.Н. Богословский в Антарктиде

В.Н. Богословский (начало 1970-х гг.)

Заседание партийного комитета МИСИ
(в центре В.Н. Богословский и В.И. Теличенко)

Аспиранты кафедры отопления и вентиляции
со своими руководителями и консультантами 22.12.1980

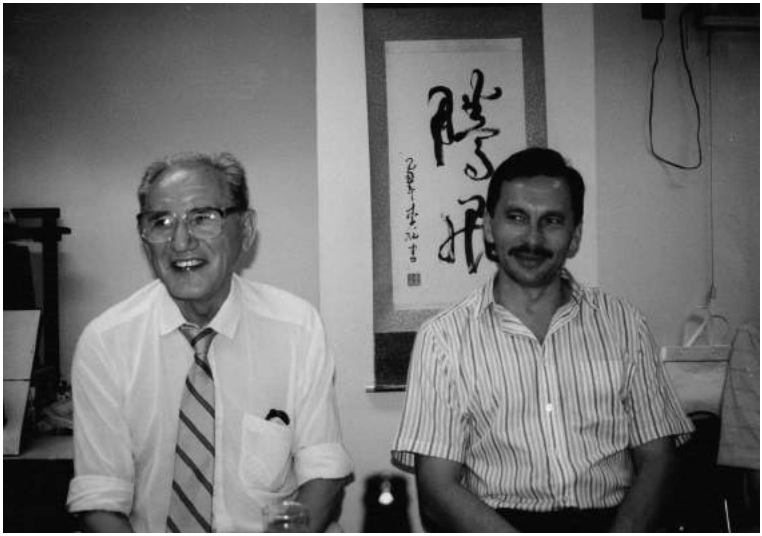
Первый ряд: Виктор Сергеевич Тишкин, Владимир Павлович Титов, Александр Николаевич Сканави, Людмила Короткова, Вячеслав Николаевич Богословский, Сабина Паулаускайте, Александр Григорьевич Егиазаров, Лев Владимирович Петров.
Второй ряд: Александр Языков, Нгуен Чонг Тхать, Виктор Булавин, Ромас Морквенас, Юрий Яковлевич Кувшинов, Юрий Степанович Краснов, Чан Ви Ланг.
Третий ряд: Николай Скутин, Валерий Ковалев, Владимир Простаков, Владимир Мальцев, Александр Ломакин, Игорь Шалаев

На Первомайской демонстрации.
В.Н. Богословский, А.Г. Егиазаров, Е.В. Казнин

В.Н. Богословский и Л.Ф. Шубин

В.Н. Богословский верхом на коне

В.Н. Богословский со своим учеником доктором технических наук Фам Куок Куаном (Вьетнам)



В.Н. Богословский со своим учеником кандидатом технических наук А.Н. Гвоздковым

В.Н. Богословский со своей ученицей кандидатом технических наук Сабиной Паулаускайте

Семья В.Н. Богословского: жена Ксения Акимовна, внук Дмитрий, Вячеслав Николаевич, зять Константин Всеволодович Григорович, дочь Ирина Вячеславовна

На тренировке по теннису

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редактора 3

Вячеслав Николаевич Богословский (*Е.Г. Малявина*) 5

Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки здания 9

История развития теории потенциала влажности до и после В.Н. Богословского (*В.Г. Гагарин*) 55

Приложение. Воспоминания о В.Н. Богословском 75

Фотографии 103

Научное издание

Богословский Вячеслав Николаевич

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К НАРУЖНЫМ ОГРАЖДЕНИЯМ ОБОЛОЧКИ ЗДАНИЙ

Монография

Под редакцией В.Г. Гагарина

Редактор *Е.Д. Нефедова*
Компьютерная правка, верстка и дизайн обложки *О.Г. Горюновой*

Подписано в печать 16.11.2013 г. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.
И-318. Уч.-изд. л. 5,0. Усл.-печ. л. 6,51. Тираж 100 экз. Заказ № 406

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет».
Издательство МИСИ — МГСУ.
Тел. (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75, (499) 183-97-95,
e-mail: ric@mgsu.ru, rio@mgsu.ru
Отпечатано в типографии Издательства МИСИ — МГСУ.
Тел. (499) 183-91-90, (499) 183-67-92, (499) 183-91-44
129337, Москва, Ярославское ш., 26