

УДК 621.1.016 7 (075.8)

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ОГРАНИЧЕННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Хрусталёв Б.М.* , академик, д.т.н., профессор,
Янчарский И.Б.** , Акельев В.Д.* , к.т.н., доцент, Черванёва Е.А.*
* Белорусский национальный технический университет
**ОАО «МАПИД»

e-mail: marichshuk@yandex.ru

В статье рассмотрены проблемы тепло- и массопереноса в ограниченных пространствах строительных конструкций при термо- и массореабилитации наружных ограждающих конструкций отапливаемых зданий, дымовых труб, стыковых сопряжений крупнопанельных ограждающих конструкций, различных воздухопотоков, методика диагностики термических сопротивлений ограждений. Предложены проекты их реализации; терминология устойчивости ограждающих конструкций и помещений отапливаемых зданий относительно аэродинамических, диффузионных и капельных потоков.

In the article problems of heat- mass-transfer in the limited areas of building constructions when heat- mass- rehabilitation of heated buildings exterior fence constructions, chimneys, joint conjugations of large-panel constructions, different air flows, the method of wall's thermal resistance diagnostic analyzed. Projects of its realization proposed. Fence constructions and heated building rooms stability concerning aerodynamic, diffusion and dropping flows terminus proposed.

(Поступила в редакцию 5 июня 2012 года)

ВВЕДЕНИЕ

Решение крупной народнохозяйственной проблемы, связанной со снижением энергопотребления в строительстве, должно обеспечить эффективное функционирование ряда важнейших отраслей индустриального комплекса, определяющих экономическую безопасность и суверенитет Республики Беларусь. Настоящая работа посвящена решению проблемы повышения энергоэффективности и надежности зданий на основе оптимизации тепло- массопереноса в ограниченных пространствах строительных материалов и конструкций. Минимизация энергопотребления в строительной отрасли проблемы тепло- и массопереноса в ограниченных пространствах актуальна вследствие больших теплопотерь через горизонтальные, вертикальные, наклонные, плоские, цилиндрические, кольцевые, сферические и др. конструкции. В связи с этим авторами разработана структурно-логическая схема в области «Тепло- и массообмена в ограниченных пространствах строительных материалов и конструкций различного назначения» (рис. 1).

Исследования по указанному направлению проводились в рамках нижеперечисленных программ и проектов сотрудниками БНТУ и специалистами-производственниками ОАО «МАПИД» – одного из ведущих предприятий строительной отрасли Республики Беларусь в соответствии с Государственными программами и проектами госбюджетных научных исследований в республике (ГБ 01-94, ГБ 06-59, ГБ 06-57, ГБ «Строительные материалы и технологии» на 2011 – 2015 гг.).

Содержание исследований соответствует отрасли «Технические науки». Область исследований соответствует п. III. 1. «Методы расчета и методики экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, средств и методов защиты от шума установок теплогазоснабжения и вентиляции», п. III. 2. «Средства, системы и процессы отопления, охлаждения, вентиляции и кондиционирования воздуха зданий различного назначения, включая оптимизацию воздушного,

теплового и влажностного режима зданий и сооружений и элементов их конструкции», п. III. 7. «Средства, системы и процессы, предназначенные для оптимизации потребления и экономии тепловой энергии и топлива; оптимизация теплотребляющих и газотребляющих систем», п. III. 9. «Тепломассообмен в зданиях, сооружениях и их элементах, в системах транспорта и трансформации тепла. Методы и оптимизация тепловой защиты зданий и различных теплотребляющих установок, оборудования и систем. Методы расчета энергосбережения в зданиях различного назначения» и п. III. 11. «Гидравлика и газодинамика систем и отдельных элементов теплогазоснабжения и вентиляции; аэродинамика помещений и зданий; аэродинамический режим территории застройки; вентиляционные струи».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработаны технологии терморевитации с использованием микро- и макромодульных контуров для горизонтальных и вертикальных поверхностей ограждений зданий и технологии их изготовления в заводских условиях, методика диагностики теплопроводности ограждающих конструкций отапливаемых помещений, подтверждаемая экспериментально-натурными обследованиями [1, 2, 3].

Конструкции, выполненные из модулей многопрофильных сечений (прямоугольных, сферических, цилиндрических, ячеистых, сотовых, концентрических и т. д.) в тепло-техническом аспекте более эффективны из материалов, термические сопротивления теплопроводности которых составляют от 3,28 до 3,43 м²К/Вт (рис. 2) [4].

Предлагаемая технология изготовления крупнопанельных изделий с использованием ограниченных воздушных контуров обеспечивает общее сопротивление теплопередаче в соответствии с нормативно-технической документацией Республики Беларусь при энерго- и ресурсосбережениях от 20 % до 25 %.

Разработана тепло-массо-коррозионная технология ревитации стволов железобетонных, металлических, кирпичных и др. труб, которые могут функционировать, например, на цементном заводе, основанная на реализации монтажа стеклопластиковых труб с толщиной стенки до 5 мм, и массой до 3000 кг. Монтаж таких труб может быть выполнен государственным авиационным аварийно-спасательным учреждением «Авиация» МЧС Республики Беларусь [5]. Разработанный вариант отличается от известных тем, что монтаж ревитационной трубы выполняется не «снизу – вверх», а «сверху – вниз». Преимущество обсуждаемого варианта состоит в следующем: стеклопластиковый газоход, до 1/3 длины дымовой трубы монтируется из участков труб, длина которых зависит от технологического оборудования завода-изготовителя. Герметичность между звеньями труб при их вертикальном расположении (согласовывается с заводом-изготовителем труб (звеньев)) обеспечивается тем, что на расстоянии до ≈1/3 высоты дымовой трубы от ее оголовка (устья) в стенке дымовой трубы выполняется не менее 4 отверстий, в которые монтируются отрезки двутавров, швеллеров, уголков, длина которых от внутренней поверхности трубы равна до 0,02 м, служащих основанием (фундаментом) стеклопластиковой трубы. Для предотвращения переноса дымовых газов между внешней поверхностью стеклопластиковой трубы и терморевитируемой поверхностью выполняется малопроницаемое кольцевое уплотнение, например, из цементно-песчаного раствора [6].

Объемы удаляемых дымовых газов в стеклопластиковых стволах вследствие малых коэффициентов гидравлических сопротивлений на трение относительно поверхностей из традиционных материалов больше, по сравнению с пропускной способностью конических труб с теми же геометрическими характеристиками, что позволяет уменьшить диаметр стеклопластикового ствола, плотность материала которого в 10 раз меньше, чем плотность стали. Материал не требует защиты от коррозии, теплоизоляции наружной поверхности, обладает прочностью, близкой к прочности углеродистой стали, при малой теплопроводности и незначительном термическом расширении. Коррозионная и атмосферостойкость обеспечивают продолжительность эксплуатации до 50 лет без капитального ремонта в любых климатических условиях.

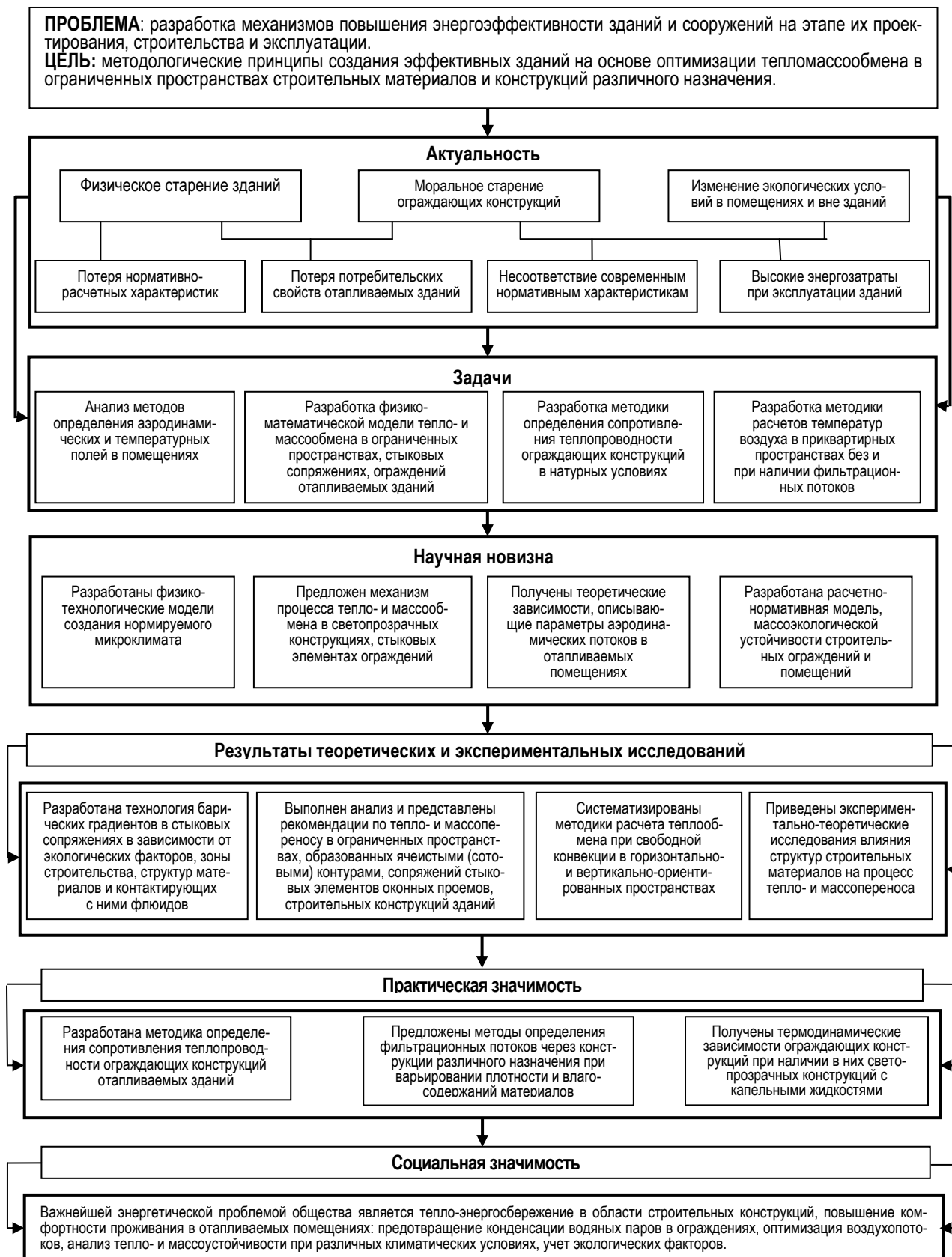
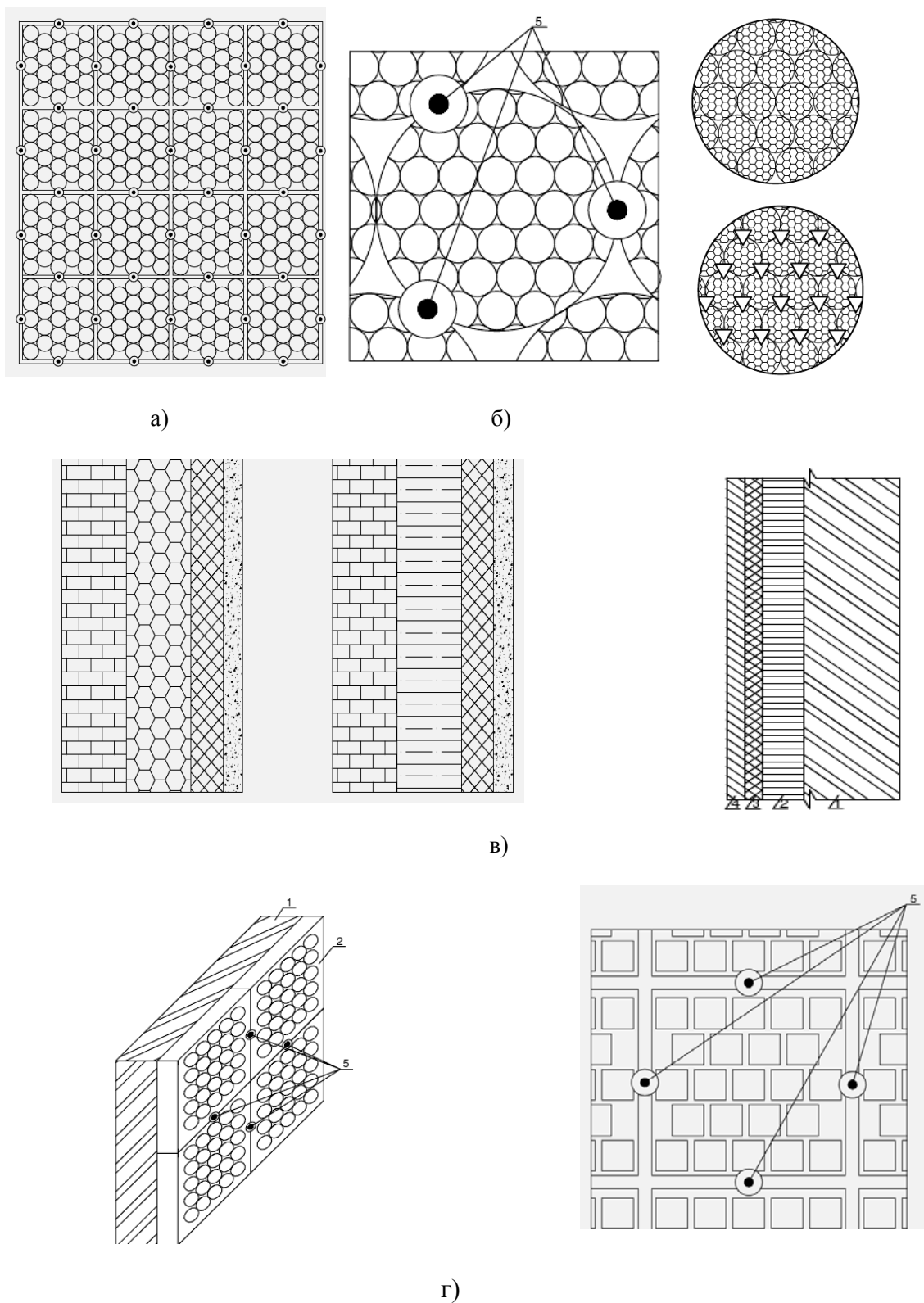


Рисунок 1 – Структурно-логическая схема исследования: «Тепломассообмен в ограниченных пространствах строительных материалов и конструкций различного назначения»



а) прямоугольный модуль; б) цилиндрические модули; в) схемы микро- и макромодулей, используемых при терморемонтации ограждающих конструкций; г) схема макромодулей; 1 – слой ограждающей конструкции; 2 – модуль с микромодулями; 3, 4 – отделочные слои модулей; 5 – крепежный элемент

Рисунок 2 – Схемы конструкций, из микро- и макромодулей

Разработаны и апробированы устройства для испытаний строительных материалов на воздухопроницаемость, установка для определения воздухопроницаемости плотных

строительных материалов методом теплового источника [7], а также измерения внутрикапиллярного давления в пористых телах, которые имеют термодинамический контакт с ограниченными пространствами [8]. Представлены методы экспериментального исследования пористости строительных материалов, проведен термодинамический анализ фазовых переходов в капиллярно-пористых телах, разработан метод СВЧ, когда в качестве хладагентов использовались пары жидкого азота с целью получения интегральных и дифференциальных кривых распределения пор по размерам; методика экспериментального определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях [9].

Показано, что имеется качественное изменение фильтрации воздуха, начиная с объемной массы материала, равной 1200 кг/м^3 , например, для керамзитобетона.

Фильтрационные потоки в них описываются линейными уравнениями. Получены расчетные формулы, связывающие фильтрационные потоки, влагосодержание, объемную массу материала, перепад давлений воздушной среды, которые применены для керамзитобетонных материалов при $\rho = 1150-1500 \text{ кг/м}^3$ и $\rho = 850-1150 \text{ кг/м}^3$. Эти уравнения были приведены к канонической форме, составлены определители, по которым построены номограммы из выравненных точек [10].

Разработана физико-математическая модель стыковых сопряжений, демонстрирующая, что оптимальное давление в эластичных (гибких, деформируемых) оболочках может быть реализовано гидростатическими способами с использованием автоматического регулирования. Оптимальное давление – это давление флюида (жидкости, пасты и т. д.) в ограничивающих оболочках сопряжений, выполненных из деформируемых материалов (резина, пластмассы, металл и т. д.), необходимое для обеспечения равенства массопотоков в единицу времени через единицу поверхности, как обычных многослойных ограждений, так и стыковых, сопряжений между ними. Выполнены расчеты температурных полей наиболее распространенных стыковых сопряжений при стационарных, нестационарных режимах и граничных условиях III рода. Дан анализ термофизических характеристик флюидов ньютоновских, неньютоновских жидкостей, мастик и т. д. (термические сопротивления, теплоемкости, коэффициенты теплопроводности, плотности, коэффициенты вязкости) при различных температурах.

Разработана технология изготовления конструкций стыков крупноразмерных элементов ограждающих конструкций зданий, в которых отсутствуют температурные напряжения, деструктивные процессы, способствующие образованию трещин, а также исключают диффузионные и фильтрационные потоки капельной, паровой, газовой фаз. Разработана методика определения водопроницаемости стыковых сопряжений в лабораторных и натуральных условиях.

Монтаж гибких, пластичных устройств в стыковых сопряжениях возможен при изготовлении панелей, блоков и т. д. в заводских условиях (рис. 3), их монтаже на строительных объектах, капитальном ремонте, реконструкции зданий, а эффективность использования предлагаемых технологий на многопрофильных объектах зависит от качества проектных решений при различных способах монтажных работ.

Разработана методика, по которой рассчитывается температура, относительная влажность, влагосодержание, энтальпия воздуха в приквартирных пространствах в зависимости от массы потока воздуха, его термодинамических характеристик, расчет которых может быть выполнен графическим методом с использованием h, d -диаграммы, при этом численные значения, полученные аналитическим и графическим путем, отличаются между собой не более чем на 1-2 %. Приращение температур воздуха в остекленных приквартирных пространствах различной ориентации, радиационных и термодинамических характеристик остекленных поверхностей, времени суток, года может достигать $22 \text{ }^\circ\text{C}$, а изменение температуры воздуха обратно пропорционально их геометрическим размерам. Температура воздуха в приквартирных пространствах и смежных помещениях равна сумме начальной температуры и избыточных температур в результате теплопередачи от более нагретого воздуха

к менее нагретому, при наличии солнечной радиации. Предложен проект пособия к СНиП по расчету тепло- и массопереноса в приквартирных остекленных пространствах. Рассмотрен теплоперенос при наличии в ограждениях капельной жидкости [11].

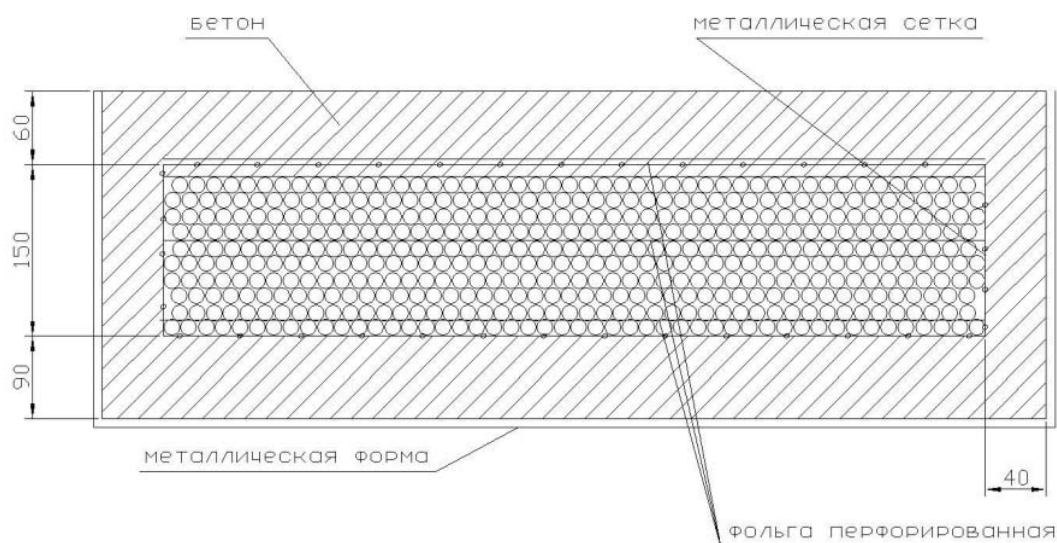


Рисунок 3 – Схема формуемой трехслойной железобетонной панели с цилиндрическими микромодулями

ТКП 45-2.04-43-2006 регламентирует расчет теплоустойчивости помещений в отопительный период, когда амплитуда колебаний температур воздуха в помещении в течение суток составляет до ± 3 °С от расчетного значения, минимальная температура внутренней поверхности ограждающей конструкции больше температуры точки росы при расчетных значениях температуры и относительной влажности внутреннего воздуха. Нормируется теплоусвоение поверхности полов, сопротивление воздухопроницанию ограждающих конструкций. При этом отсутствуют сведения об аэродинамической, диффузионной устойчивости, устойчивости относительно капельной влаги, от которых во многом зависят микроклимат, долговечность и энергосбережение.

Аэродинамическая устойчивость жилых помещений зависит от функционирования вентиляционных каналов, шахт, аэродинамических потерь на трение и местные сопротивления, расстояний от поверхностей наружных ограждений до фронтальной плоскости жалюзийных решеток кухонных, ванных и туалетных комнат. Представлены зависимости для расчетов потерь давления при ламинарном и турбулентном режимах; показано, что аэродинамические потери линейно зависят от геометрических размеров «живого сечения» венткоммуникаций, скорости потоков воздуха. На аэродинамическую устойчивость жилых помещений влияют наличие теплых чердаков и процессы теплообмена между воздушными потоками от жалюзийных решеток до устья вентиляционных шахт. Локальные температуры, плотность массопотоков из помещений на различных участках венткоммуникаций зависят от термических сопротивлений теплопередаче чердачных перекрытий, сопряжений карнизных элементов и ограждений, степени герметизации чердачных помещений, расстояний от устья вентиляционных каналов до входа в вентиляционную шахту. Наличие светопрозрачных приквартирных пространств более чем на 20 % увеличивает термическое сопротивление теплопередаче участков наружных ограждающих конструкций, а аэродинамические сопротивления увеличиваются в 5÷100 раз. Аэродинамическая устойчивость и тепловой режим отапливаемых помещений могут быть восстановлены при наличии в светопрозрачных конструкциях автоматизированных воздушных устройств (клапанов).

Аэродинамические характеристики зданий зависят от площади светопрозрачных ограждений, дверей, наружных стен, разности давлений у наружной и внутренней поверхностей ограждающих конструкций, сопротивлений воздухопроницаемости стен, перекрытий первых этажей, окон, наружных дверей, стыковых сопряжений, их геометрических размеров стыков и т. д.

Предложены и обоснованы следующие термины и расчетные зависимости:

– «коэффициент аэродинамической устойчивости (воздухопроницаемости) ограждения», характеризующий материал с точки зрения сопротивления колебаниям общего давления воздушной среды у менее и более нагретых поверхностей ограждения;

– «коэффициент диффузионной устойчивости ограждения», характеризующий материал относительно сопротивления колебаниям парциального давления водяного пара в воздухе при соответствующих амплитудах диффузионных потоков пара;

– «коэффициент устойчивости ограждения относительно капельной влаги», характеризующий его с точки зрения колебаний потенциала массопереноса капельной влаги при соответствующих амплитудах массопотоков;

– «коэффициент массоусвоения» – отношение амплитуды колебания потока массы к величине амплитуды колебания у более нагретой поверхности, зависит от периода колебаний потока массы, тепло- и массообменных характеристик ограждений;

– «аэродинамическая, диффузионная инерция» - способности помещений сопротивляться колебаниям общих и парциальных давлений водяного пара при переменных массообменных воздействиях.

Затухание аэродинамических волн в ограждениях минимально, если его слои не имеют аэродинамической устойчивости, при этом в них вероятны волны, обусловленные ветровым и гравитационным давлениями различного направления, если аэродинамическим воздействиям подвергаются поверхности ограждений с различными температурами. Плотности массо-воздухотоков в венткоммуникациях, аэродинамическая устойчивость помещений зависят от пространственного распределения атмосферного давления.

Рассматриваемые вопросы являются актуальными, так как они затрагивают и социальные аспекты проблемы, связанной с повышением экономической эффективности, надежности и прочности строительных конструкций различного назначения. Работы в этом направлении будут продолжены совместно сотрудниками БНТУ и специалистами-производственниками ОАО «МАПИД» с привлечением всех заинтересованных сторон.

ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований получены:

- теоретические, численные и экспериментальные результаты процессов тепло- и массопереноса в ограниченных пространствах применительно к строительным конструкциям и сооружениям;

- зависимости для расчета термодинамических параметров воздуха в приквартирных остекленных пространствах;

- научные принципы создания энергоэффективных технологий терморезабилитации строительных конструкций и стволов дымовых труб при монтаже стеклопластиковой защитной трубы «сверху вниз»;

- зависимости для расчета паро- гидро- аэродинамической устойчивости и экологической безопасности ограждений, стыковых сопряжений отапливаемых жилых и общественных зданий на этапе их проектирования;

- зависимости для определения термических сопротивлений ограждающих конструкций отапливаемых зданий при контактных и бесконтактных измерениях температурных полей внешних поверхностей наружных ограждений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акельев, В.Д. Тепло- и массообмен в ограниченных пространствах строительных конструкций и сооружений / В.Д. Акельев; под общ. ред. А.П. Несенчука. – Минск : Белорус. нац. техн. ун-т, 2010. – 316 с.
2. Наружное ограждение здания : пат. 5292 Респ. Беларусь, МПК (2006) E 04B 2/42 / Б.М. Хрусталёв, В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, И.М. Золотарёва; заявитель Белорус. нац. гос. ун-т. – № u 20080483; заявл. 17.06.08; опубл. 30.06.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 3. – С. 215–216.
3. Теплоперенос в ограниченных контурах наружных ограждений отапливаемых зданий / Б.М. Хрусталёв, В.Д. Сизов, В.Д. Акельев, И.М. Золотарёва // Современные архитектурно-конструктивные решения для снижения стоимости и повышения качества строительства. Энерго- и ресурсосбережение при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений : сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. семинара по реализации задач гос. программы ориентиров. фундам. исслед. «Стр-во и архитектура» (II Workshop C & A 2007), Минск, 19–21 сент. 2007 г. : в 3 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; [под ред. Б.М. Хрусталёва, С.Н. Леоновича]. – Минск, 2008. – Т. 1. – С. 10–22.
4. К вопросу диагностики сопротивлений теплопроводности наружных ограждающих конструкций зданий / Б.М. Хрусталёв, В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, И.М. Золотарёва // Энергетика: изв. вузов и энергет. об-ний СНГ. – 2010. – № 4. – С. 36–43.
5. Акельев, В.Д. К вопросу реконструкции дымовых труб / В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, В.В. Питиримов // Энергетика: изв. вузов и энергет. объединений СНГ. – 2009. – № 4. – С. 69–77.
6. Дымовая труба: пат. ВУ 4172 U 4172 Респ. Беларусь, МПК (2006) E 04H 12/00 / Б.М. Хрусталёв, С.Н. Леонович, В.Д. Акельев, В.Д. Сизов, Н.Д. Байлук ; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № ГР 20070513; заявл. 11.07.07 ; опубл. 07.11.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 2. – С. 205.
7. Устройство для испытаний строительных материалов на воздухопроницаемость: а. с. 393682 СССР, G 01n 33/38 / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев, Л.В. Астапова; Белорус. политехн. ин-т. – № 1797027/29-33; заявл. 16.06.72 ; опубл. 10.08.73 // Открытия. Изобрет. Пром. образцы. Товар. знаки. – 1973. – № 33. – С. 180.
8. Устройство для измерения внутрикапиллярного давления в пористых телах: а. с. 516921 СССР, М. Кл. 2 G 01 L 7/08 / С.П. Баранов, М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев, Т.А. Уфимцева; Мин. фил. произв. об-ния «Техэнергохимпром». – № 1904240/26; заявл. 02.04.73(21); опубл. 05.06.76 // Центр. науч.-исслед. ин-т патент. информ. Гос. ком. Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий. – 1976. – 3 с.
9. Устройство для определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций: а. с. 845098 СССР, G 01 N 33/38 / В.Д. Акельев, Г.Е. Гурова; Белорус. политехн. ин-т. – № 2790279/23-33; заявл. 07.06.79; опубл. 17.07.81 // Открытия. Изобрет. Пром. образцы. Товар. знаки. – 1981. – № 25. – С. 210.
10. Солдаткин, М.Т. Расчет фильтрации воздуха через керамзитобетонные материалы / М.Т. Солдаткин, В.Д. Акельев // Вес. Акад. наук БССР. Сер. фіз.-энергетыч. навук. – 1968. – № 3. – С. 86–92.
11. Хрусталёв, Б.М. К вопросу теплового режима в приквартирных пространствах / Б.М. Хрусталёв, В.Д. Акельев, В.Д. Сизов // Строит. наука и техника. – 2011. – № 1. – С. 17–21.