



Моделирование в COMSOL Multiphysics энергосбереже- ния типовых зданий ЖКХ при реконструкции и ремонте

Введение

Во многих регионах страны большинство зданий и сооружений построены и продолжают строиться по типовым проектам, и в настоящее время на значительной их части с целью обеспечения комфортного проживания жителей проводится обновление фасадов, ремонт или реконструкция помещений. Практика применения технологий обслуживания подобных строительных фондов ЖКХ показала их достаточно высокие возможности для проведения модернизации при относительно малых материальных и временных затратах. Вследствие этого технологии обслуживания подобных зданий и сооружений будут востребованы и в будущем [1].

Следовательно, уже сейчас необходимы теоретические разработки и обоснования по оптимизации, например, технологий комфортного теплового режима помещений данной категории зданий. Решать подобные задачи приходится в условиях значительных различий климата в регионах страны и трудно прогнозируемой изменчивости его, особенно в последние годы. Более привычными и проработанными для регионов можно считать имеющиеся решения для малоэтажных фондов, но совсем иначе дело обстоит с современными многоэтажными зданиями [4–9].

В связи с этим, при планировании ремонтных работ жилищного фонда в ЖКХ наметился интерес к предварительному

моделированию возможных результатов и к оперативному получению необходимой информации. Известно, что для современных строительных объектов можно воспользоваться так называемой «цифровой копией», созданной при помощи технологии информационного моделирования зданий — Building Information Modeling (BIM). Такая модель предоставляет структурно упорядоченную и обновляемую в реальном времени информацию, которую используют не только при проектировании и строительстве зданий, но и в период их эксплуатации. Последнее особенно важно для служб ЖКХ, так как технологии BIM, как правило, тесно связаны с технологиями моделирования энергопотребления (или «энергетического баланса») здания — Building Energy Modeling (BEM), отражающими основные параметры энергоэффективности здания, в том числе, например, энергопотребление в течение определённого времени. Повышение энергосбережения отдельных узлов и помещений зданий при эксплуатации, безусловно, отразится на достоверности моделирования эффективности их функционирования в целом [2, 3].

Технологии же энергосбережения зданий и отдельных помещений должны основываться, прежде всего, на характеристиках теплообменных процессов, происходящих внутри стен при изменении погодных условий окружающей среды.

Рецензия эксперта на статью получена 10.06.20 [Expert review on the article received on June 10, 2020].

УДК 697.13. Научная специальность: 05.23.03.

Моделирование в COMSOL Multiphysics энергосбережения типовых зданий ЖКХ при реконструкции и ремонте

В. А. Сучилин, д.т.н., профессор; **А. С. Кочетков**, старший преподаватель; **Н. Н. Губанов**, старший преподаватель, Российский государственный университет туризма и сервиса (РГУТиС)

Практика обслуживания типовых зданий ЖКХ показала высокие возможности их модернизации. На основе анализа задач энергосбережения зданий сделаны выводы о важности повышения тепло- и влаготеплозащитности тепловых мостов при оценке эффективности их функционирования. Подобные задачи успешно решаются на моделях в ПО COMSOL Multiphysics с заданной точностью результатов. Данный метод оценки энергосбережения проверен для теплового моста в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: обслуживание типовых зданий, энергосбережение, модернизация, тепловой мост, моделирование в COMSOL Multiphysics.

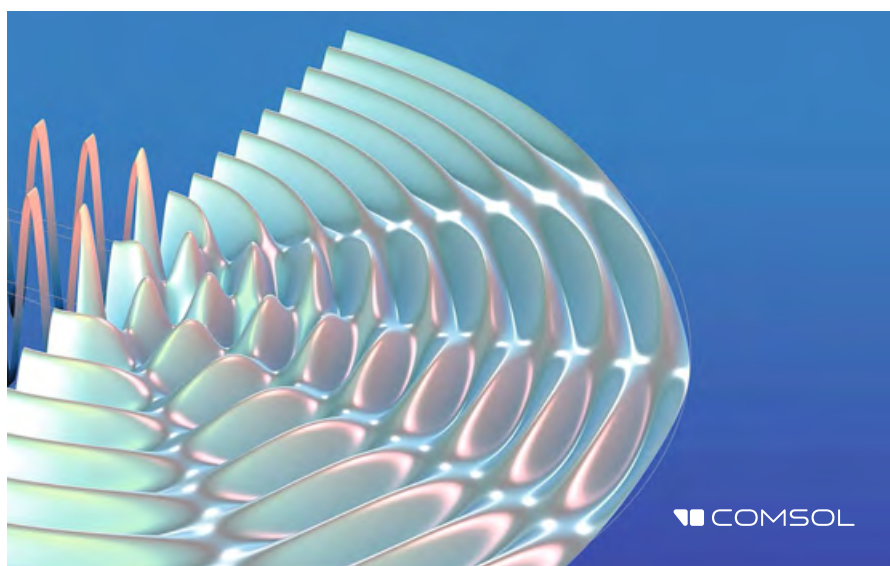
UDC 697.13. The number of scientific specialty: 05.23.03.

Modeling in COMSOL Multiphysics of energy saving of typical housing and communal services buildings during reconstruction and repair

V. A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **A. S. Kochetkov**, senior lecturer; **N. N. Gubanov**, senior lecturer, Russian State University of Tourism and Service (RGUTIS)

The practice of servicing typical housing and communal services buildings has shown high opportunities for their modernization. Based on the analysis of the energy saving tasks of buildings, conclusions are drawn about the importance of increasing the heat and moisture resistance of thermal bridges in assessing the effectiveness of their functioning. Similar problems are successfully solved on models in COMSOL Multiphysics software with a given accuracy of the results. This method of evaluating energy savings is tested for a thermal bridge depending on operating conditions.

Key words: maintenance of typical buildings, energy saving, modernization, thermal bridge, modeling in COMSOL Multiphysics.



В итоге, зная качественные и количественные параметры паровоздушной смеси в стенах здания, места возможного образования конденсата или льда и выбрав правильный материал и способ утепления, можно избежать не только появления сырости и плесени в доме, но и продлить срок службы здания, обеспечить комфортный микроклимат в нем и сэкономить немалые средства при эксплуатации [9].

В исследуемой модели представлена малоизученная задача совместного влияния тепла и влажности на функционирование строительных конструкций типа теплового моста, состоящего из внутренней тёплой стены здания, слоя теплоизоляции, отделяющей стену здания от холодной внешней среды, и стального стержня, их соединяющего. Модель представляет единичный строительный узел, соответствующий структуре теплового моста. Тепловая защита типового здания складывается из определённого набора подобных элементов на фасаде здания при модернизации или ремонте.

При решении 3D-задач теплопроводности требования, которым должны соответствовать программы расчёта температурных полей и тепловых потоков через ограждающие конструкции, описываются европейским стандартом EN ISO 10211:2007 [11]. Таким образом, при моделировании тепловых мостов в строительстве предусмотрен ряд тестовых исследований с целью проверки существующих для этого численных методов. Программное обеспечение COMSOL Multiphysics успешно проходит все подобные тестовые испытания, описанные в стандарте, с корректным построением моделей узлов, получением расчётной сетки и заданной точности результатов [12].

Кроме того, в COMSOL Multiphysics можно успешно решать задачи моделирования (в 2D и 3D) совместного влияния тепла и влажности на функционирование строительных конструкций типа теплового моста [9, 10]. Также возможна интеграция результатов COMSOL Multiphysics с программным комплексом для автоматизированного проектирования Revit, реализующим принцип информационного моделирования зданий (BIM).

В исследуемой модели представлена малоизученная задача совместного влияния тепла и влажности на функционирование строительных конструкций типа теплового моста, состоящего из внутренней тёплой стены здания, слоя теплоизоляции, отделяющей стену здания от холодной внешней среды, и стального стержня, их соединяющего

Конструкция модели теплового моста состоит из блока силикатного кирпича площадью 1 м^2 , толщиной $0,3 \text{ м}$ и блока теплоизоляционного слоя толщиной $0,2 \text{ м}$, скреплённых стальным стержнем длиной $0,4 \text{ м}$, диаметром $0,02 \text{ м}$ (геометрические размеры модели могут не совпадать с размерами реальной конструкции теплового моста). Геометрия теплового моста (без кирпичного блока) соответствовала модели Thermal Bridges in Building Construction — 3D Iron Bar Through Insulation Layer [12], для которой с помощью интерфейса Heat Transfer in Building Materials решалось стационарное уравнение теплообмена.

В нормальных условиях теплопроводность силикатного кирпича равна $0,7 \text{ Вт/(м·К)}$, паропроницаемость составляет $0,11 \text{ мг/(м·ч·Па)}$, теплопроводность материала теплоизоляционного блока равна $0,032 \text{ Вт/(м·К)}$, паропроницаемость составляет $0,3 \text{ мг/(м·ч·Па)}$, стальной стержень имеет более высокую теплопроводность — 50 Вт/(м·К) .

Сопряжённый перенос тепла и влаги в строительных материалах моделируется с помощью интерфейсов Heat Transfer in Building Materials и Moisture Transport in Building Materials. При этом строительные материалы рассматриваются как пористые среды, в которых влага существует как в жидкой, так и в паровой фазах, и происходит перенос жидкой влаги капиллярными силами и перенос пара путём диффузии. Такие характеристики строительных материалов, как коэффициенты теплопроводности, диффузии и паропроницаемости, зависят от величины относительной влажности. Эти функциональные зависимости из библиотеки материалов COMSOL используются в данной модели.

Холодные и тёплые поверхности теплового моста подвержены действию конвективных потоков влажного воздуха. Стандарт ISO 10211:2007 определяет параметры конвекции с помощью величины теплового сопротивления R , которое связано с коэффициентом теплопереноса h [$\text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$] согласно зависимости $h = 1/R$, и коэффициента влагопереноса β [$\text{г/м}^2\cdot\text{с}$].

Результатом приведённого исследования являются характеристики энергозащищённости при функционировании теплового моста зданий ЖКХ в зависимости от условий эксплуатации (параметров температуры и влажности внутри помещения и внешней среды, свойств материалов моста и др.), полученные при компьютерном моделировании одновременного переноса тепла и влаги внутри стены в стационарной задаче.

На первом этапе в данной модели для исследования функциональных характеристик энергозащищённости теплового моста здания заданы условия температуры наружного воздуха -12°C и относительной влажности 87% (что соответствует условиям в момент времени 12:00 15 января в городе Архангельске по базе метеорологических данных ASHRAE от 2017 года). Приняты также температура воздуха в помещении 20°C и относительная влажность 50% . Диффузия паровоздушной смеси в стене всегда идёт в направлении от тёплого к холодному, то есть движение её в нашем случае направлено изнутри дома наружу.

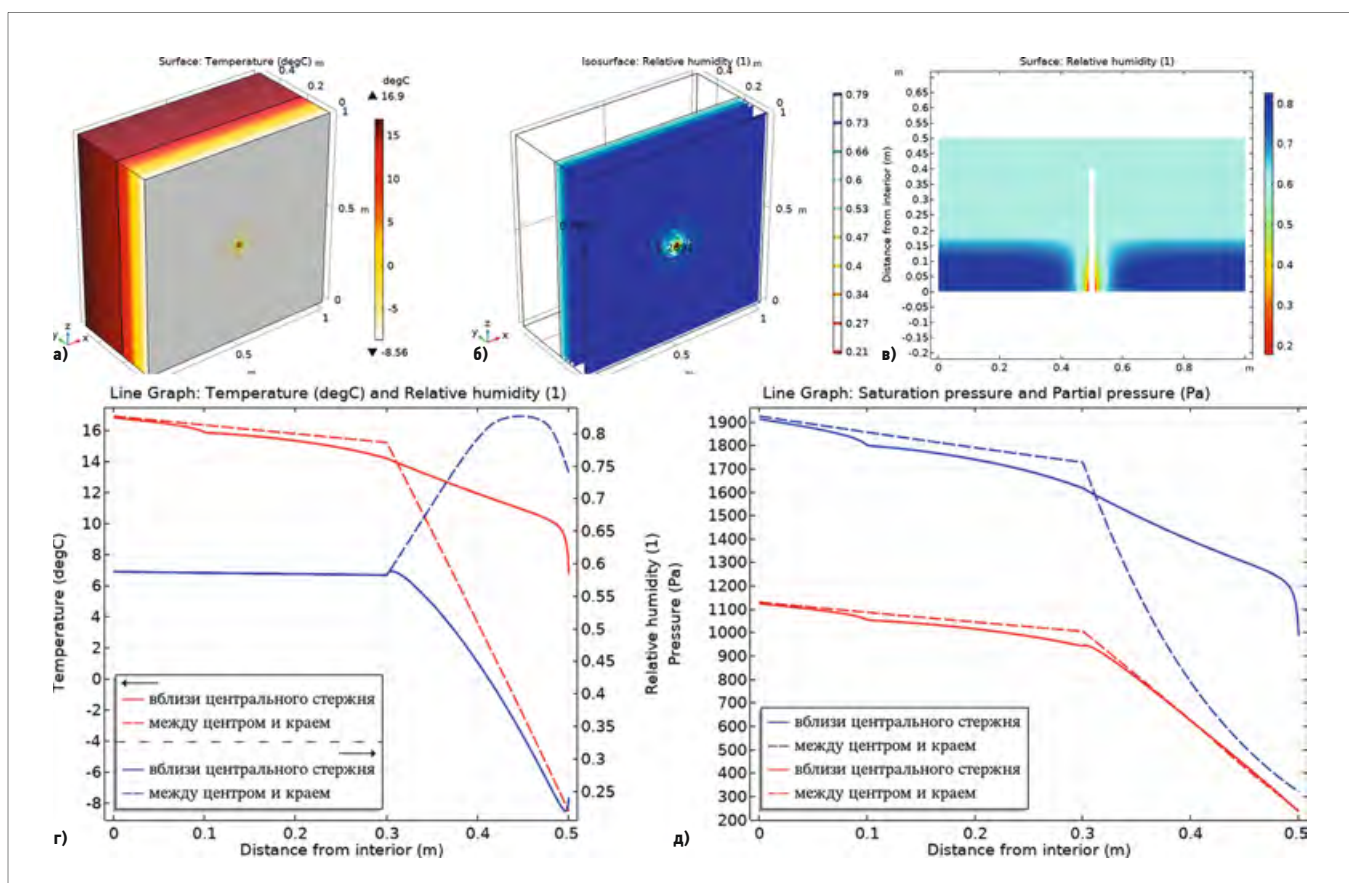


Рис. 1. Функциональные характеристики энергозащищённости теплового моста (модель 1) а — распределение температуры на поверхностях; б — распределение относительной влажности в блоке теплоизоляции; в — распределение относительной влажности в перпендикулярном сечении; г — распределение температуры и относительной влажности по толщине теплового моста в сечениях 1 и 2; д — распределение парциального давления и давления насыщенного пара по толщине теплового моста в сечениях 1 и 2]

Представленный тепловой мост (модель 1) обладает двухслойной структурой, причём паропроницаемость слоёв увеличивается в направлении диффузии водяного пара. Следовательно, пар из теплоизоляционного слоя может выйти наружу без задержки. Однако в изучаемой модели на ход процесса тепло- и влагопереноса влияют как параметры паровоздушной смеси, так и распределение температуры в слоях стены. От фазового же состояния влаги и локализации её в стене во многом зависит эффективность теплового моста при эксплуатации зданий. Результаты проведённых исследований представлены ниже.

На рис.1 показаны функциональные характеристики энергозащищённости теплового моста. На рис. 1а приведено распределение температуры на поверхностях структурных блоков теплового моста. Видно, что внутренняя поверхность блока стены нагрета примерно до температуры 17°C, и за счёт различной теплопроводности материалов моста температура между блоками изменяется неравномерно. На границе с блоком теплоизоляции температура равна примерно 10°C, и далее в блоке изоляции снижается до -5°C. На наружной поверхности мо-

ста температура около -9°C. Температура стального стержня вследствие высокой теплопроводности на внешней стороне моста составляет примерно 11°C.

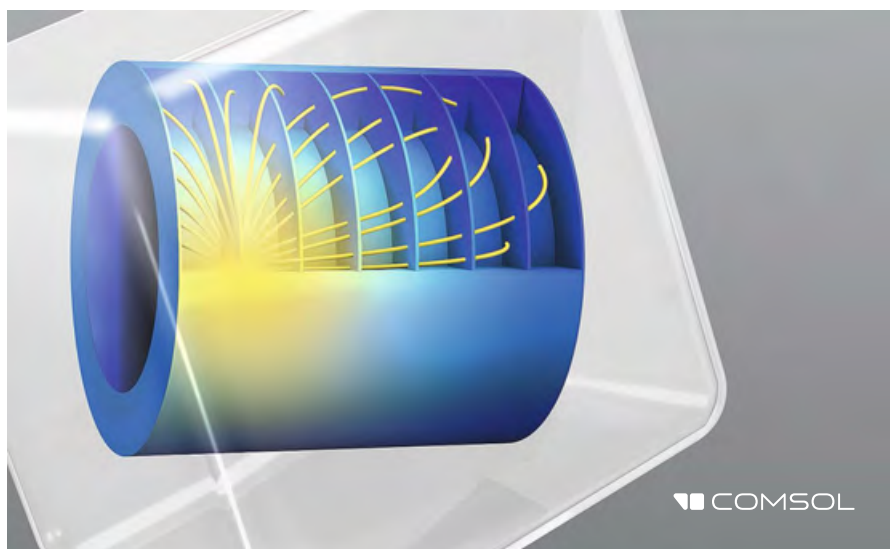
На рис. 1б дано распределение относительной влажности в блоке теплоизоляции. Видно, что относительная влажность на границе блока стены и теплоизоляции примерно равна 58%, а далее по слоям распределяется неравномерно и на внешней поверхности моста доходит до 80% при относительной влажности наружного воздуха в 87%.

На рис. 1в приведено распределение относительной влажности в перпендикулярном сечении теплового моста через центр стального стержня. Видно, что относительная влажность в кирпичной стене практически одинакова и равна 58%.

Стальной стержень, обладая высокой теплопроводностью, оказывает значительное влияние на распределение температуры в блоках моста. Особенно выражено его влияние на изменение влажности в прилегающей к нему зоне теплоизоляционного блока

От линии разграничения блока кирпичной стены и блока теплоизоляции относительная влажность к внешней поверхности теплоизоляции растёт до 80%, но не равномерно. Это вызвано тем, что стальной стержень, обладая высокой теплопроводностью, оказывает значительное влияние на распределение температуры в блоках моста. Особенно выражено его влияние на изменение влажности в прилегающей к нему зоне теплоизоляционного блока.

На рис. 1г более детально исследуется распределение температуры (красные линии) и относительной влажности (синие линии) в сечениях теплового моста перпендикулярно характерным точкам 1 и 2. Точка 1 — середина отрезка между центром и краем фронтальной поверхности моста, точка 2 — на фронтальной поверхности вблизи стального стержня. Видно, что температура на внутренней поверхности блока стены в обоих случаях около 17°C. Далее температура в сечении по точке 1 (пунктирная линия) медленно снижается и на границе с блоком теплоизоляции равна 15,2°C. В блоке теплоизоляции температура резко снижается и доходит до -8,6°C на границе с внешней поверхностью теплового моста.

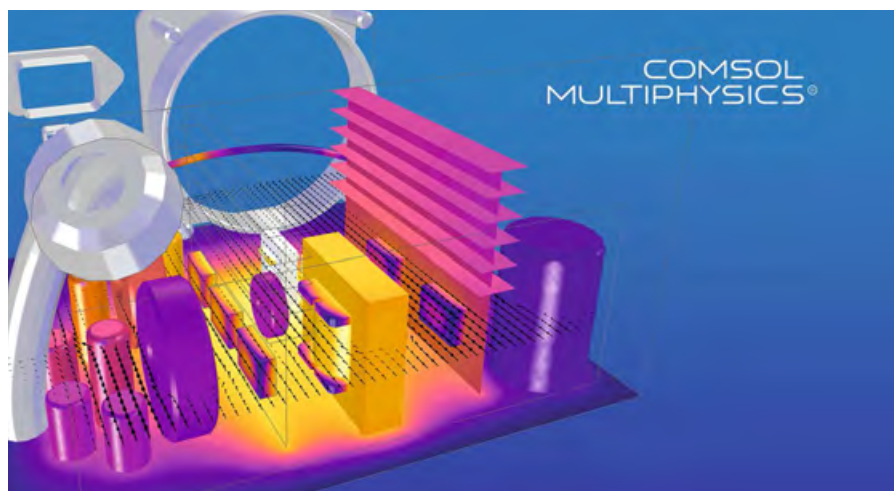


В сечении 2 вблизи стального стержня (сплошная линия) температура в блоке кирпичной стены немного ниже, чем в первом случае, но в блоке теплоизоляции уменьшение температуры гораздо более плавное вплоть до внешней поверхности теплового моста, где она равна 7°C .

Существенное различие в распределении температур в сечениях 1 и 2 вызвано повышенной теплоотдачей стального стержня по всей толщине моста, что приводит к потерям тепловой энергии в нём. Это говорит о слабой энергозащитённости теплового моста. Снижения тепловых потерь через скрепляющий центральный стальной стержень моста можно добиться заменой его, например, на прочный полимерный стержень с минимальной теплопроводностью.

Видно также, что относительная влажность по всей глубине кирпичной стены до границы с блоком теплоизоляции моста практически остаётся неизменной в обоих случаях и равна примерно 58%. Затем в сечении 1 (пунктирная линия) её значение растёт в блоке теплоизоляции до максимального (около 85%) на расстоянии примерно в 3/4 толщины слоя и уменьшается до 75% на внешней поверхности при относительной влажности окружающей среды 87%. В сечении 2 (сплошная линия) от границы блока теплоизоляции она резко падает и вблизи внешней поверхности теплоизоляции уже менее 25%. В данном случае снижение влажности в теплоизоляции вызвано влиянием нагретого центрального стального стержня, который имеет в этой области температуру около 10°C , что приводит к испарению влаги в ограниченной стержнем зоне, как было отмечено выше, и к определённым тепловым потерям моста. Способ устранения данного негативного явления указан ранее.

Известно, что значение влажности воздуха (паровоздушной смеси) определяет парциальное давление пара в его составе,



а начальная температура — давление насыщенности пара.

Так как в блоке силикатного кирпича температура в сечении 1 медленно снижается с 17 до $15,2^{\circ}\text{C}$, то с той же скоростью уменьшается и давление насыщенных паров в стене, при этом относительная влажность остаётся почти постоянной. Далее в теплоизоляционном блоке резко возрастает скорость уменьшения температуры и, следовательно, давления насыщенных паров, причём влагонасыщение паровоздушной смеси остаётся неизменным, а относительная влажность увеличивается до 85%.

По графику температуры видно (красная пунктирная линия) дальнейшее снижение температуры до $-8,6^{\circ}\text{C}$, что приводит в этой зоне теплоизоляции к частичной конденсации пара из паровоздушной смеси (зона «точки росы») и к понижению парциального давления водяного пара, а также к снижению относительной влажности паровоздушной смеси до 75%.

На рис. 1д показаны графики распределения парциального давления (красные линии) и давления насыщенного водяного пара (синие линии) в сечениях теплового моста перпендикулярно указанным выше точкам 1 и 2. Видно, что парциаль-

ное давление пара на внутренней поверхности стены в сечении по точке 1 примерно равно 1130 Па (красная пунктирная линия). Там же давление насыщенного пара равно 1920 Па (синяя пунктирная линия). После плавного уменьшения обеих величин в блоке кирпичной стены скорость их убывания в блоке теплоизоляции резко возрастает и на расстоянии примерно в 3/4 толщины слоя теплоизоляции линии сближаются при значении около 300 Па . Это явление отражается на относительной влажности паровоздушной смеси в данной зоне блока теплоизоляции (характер изменения описан

выше). В сечении 2 по толщине теплового моста (сплошные красная и синяя линии) на изменение параметров пара существенно влияет близость нагретого стального стержня.

Важно отметить, что исследования совместного действия тепла и влажности на тепловой мост показали возможность конденсации в нем влаги. Хотя зоны конденсата и кристаллов льда при минусовой температуре находятся не в кирпичной стене, а в блоке теплоизоляции, всё же необходимы исследования возможности снижения концентрации пара в паровоздушной смеси теплового моста и устранения конденсации влаги.

В целях исследования возможности исключения конденсации водяного пара в блоке теплоизоляции теплового моста при тех же исходных параметрах температуры и относительной влажности внешней среды в модели 2 между блоком кирпичной стены и блоком теплоизоляции установлен слой влагозащитной плёнки, создающий дополнительный барьер для диффузии водяного пара со стороны кирпичной стены. Параметры влагозащитного барьера, такие как коэффициент паростойкости и толщина, задаются в узле Thin Moisture Barrier.

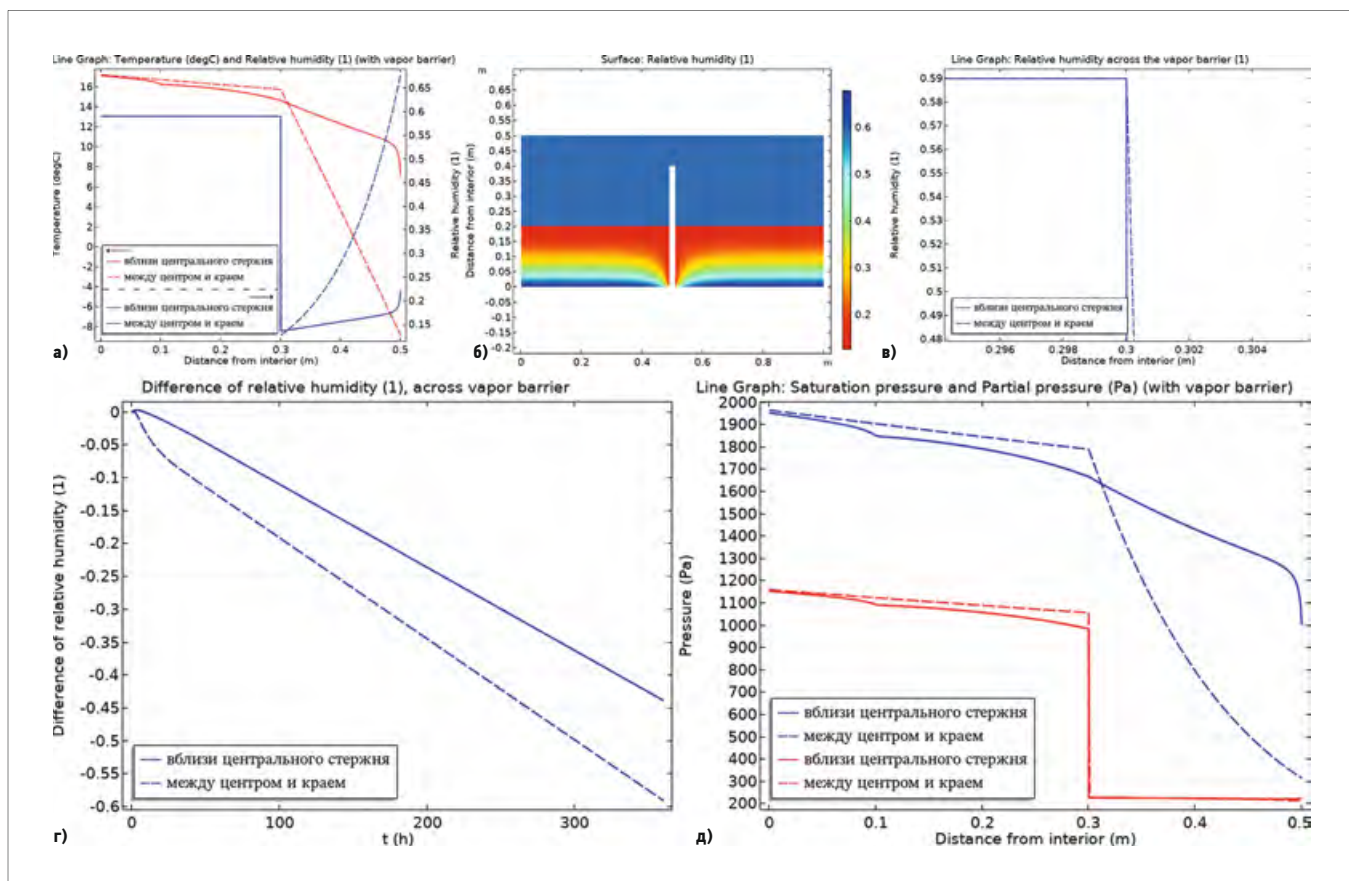


Рис. 2. Функциональные характеристики энергозащищённости теплового моста, оснащённого плёночным барьером (модель 2) [а — распределение температуры и относительной влажности по толщине теплового моста в сечениях 1 и 2; б — распределение относительной влажности в перпендикулярном сечении; в — фрагмент графика изменения относительной влажности в сечении 1 в области защитного барьера; г — экстраполяция по времени разности значений относительной влажности на правой и левой границах барьера; д — распределение парциального давления и давления насыщенного пара по толщине теплового моста в сечениях 1 и 2]

Функциональные характеристики энергозащищённости теплового моста при включении в геометрию модели влагозащитающего плёночного барьера показаны на рис. 2. На рис. 2а приведено распределение температуры и относительной влажности по толщине теплового моста в сечениях по указанным выше точкам 1 и 2. Температурные характеристики теплового моста по сравнению с рис. 1г мало изменились. В распределении относительной влажности есть заметные изменения. Видно, что влажность по всей глубине кирпичной стены теплового моста практически стабилизировалась на уровне 59% для каждого сечения. Затем она резко падает в зоне защитного барьера до 13% (в то же время при увеличенном масштабе заметен малый угол отклонения пунктирной линии от вертикали защитного барьера). Далее относительная влажность в сечении 1 (пунктирная линия) в блоке теплоизоляции растёт до 68%. Влажность же в сечении 2 (сплошная линия) увеличивается медленнее и только до 20–23% вблизи внешней поверхности теплового моста. Здесь очевидно влияние центрального стального стержня с высокой теплопроводностью.

На рис. 2б приведено распределение относительной влажности в перпендикулярном сечении теплового моста через центр стального стержня. Видно, что относительная влажность в кирпичной стене равномерно распределена при значении 59%. На линии разграничения блока кирпичной стены и блока теплоизоляции влагозащитной плёнкой относительная влажность равна примерно 13%. Далее максимальное значение относительной влажности достигает 68% вблизи внешней поверхности теплоизоляции, но её распределение неравномерно. Зональный характер распределения более выражен по сравнению с рис. 1в. Хорошо заметно также и влияние нагретого стального стержня на распределение влажности в теплоизоляционном блоке.

Видно, что относительная влажность в кирпичной стене равномерно распределена при значении 59%. На линии разграничения блока кирпичной стены и блока теплоизоляции влагозащитной плёнкой относительная влажность равна примерно 13%

На рис. 2в фрагмент графика изменения относительной влажности в сечении 1 в области защитного барьера показан в увеличенном масштабе. Малый угол отклонения пунктирной линии от вертикали говорит о незначительной диффузии водяного пара через защитный плёночный барьер со стороны кирпичной стены в сторону теплоизоляции, зависящей от толщины плёночного барьера, его свойств, времени достижения стационарного состояния и внутренних характеристик паровоздушной среды.

Для оценки надёжности функционирования установленного защитного барьера в течение длительного времени при достаточно сложных климатических условиях (относительной влажности 87% и температуре воздуха внешней среды -12°C) проведена экстраполяция скорости диффузии паровоздушной смеси через плёночный барьер между кирпичной стеной и теплоизоляцией моста. На рис. 2г по графикам разности значений относительной влажности на правой и левой границах барьера можно определить время диффузии водяного пара через защитный барьер. Уменьшение влажности от 59% до 13% для сечений 1 и 2

происходит с различной скоростью. Так в сечении 1 (пунктирная линия) разность $-0,46$ достигается примерно за 270 ч (около 11 суток). Следовательно, заданные параметры защитного барьера позволяют поддерживать минимальные значения диффузии водяного пара на границе кирпичная стена — теплоизоляция для теплового моста в срединной его зоне (в сечении по характерной точке 1) в течение около 11 суток. Очевидно, что за этот период времени климатические условия изменяются, они будут менее жёсткими по относительной влажности окружающей среды, что позволит и далее поддерживать комфортные характеристики по влажности воздушной среды в помещении. Параметры защитного плёночного барьера можно предварительно задавать и для других климатических условий внешней среды и получать при реализации модели в COMSOL Multiphysics соответствующие значения скорости диффузии паровоздушной смеси. Тем самым предварительно планировать комфортные условия в помещении для разных сезонов года.

В сечении 2 (сплошная линия), как было показано ранее, распределение влажности искажается за счёт высокой теплопроводности стального стержня, поэтому меньшая скорость диффузии здесь не может быть основой общей оценки эффективности установленного защитного барьера. В то же время результат является дополнительным подтверждением необходимости замены стального стержня на полимерный или армирования его полимерным материалом.

На рис. 2д показаны графики распределения парциального давления (красные линии) и давления насыщенного пара (синие линии) в сечениях 1 и 2 тепло-

Полученный результат является дополнительным подтверждением необходимости замены стального стержня на полимерный или армирования его полимерным материалом

вого моста. Парциальное давление пара на внутренней поверхности стены в сечении 1 примерно равно 1160 Па (красная пунктирная линия). Там же давление насыщенного пара равно 1960 Па (синяя пунктирная линия). После плавного уменьшения обеих величин в блоке кирпичной стены, соответственно, до 1060 и 1800 Па графики принципиально различны. Парциальное давление пара на линии разграничения блока кирпичной стены и теплоизоляции мгновенно падает до 220 Па, что соответствует скачку относительной влажности в зоне плёночного барьера с 59% до 13% (рис. 2б). В слое теплоизоляции парциальное давление пара остаётся равным 220 Па. Давление же насыщенного пара снижается к внешней поверхности теплоизоляции до 300 Па. По сравнению с рис. 1д здесь нет области совпадения парциального давления и давления насыщенного пара. Следовательно, отсутствует возможность возникновения конденсата в зоне теплоизоляции. Это подтверждается и графиком распределения относительной влажности (рис. 2а), где показан плавный рост относительной влажности к внешней поверхности теплоизоляции до значения 68%. В сечении 2 (сплошные красная и синяя линии) связи между исследуемыми параметрами паровоздушной смеси искажаются под действием нагретого стального стержня.

В целом модернизация теплового моста установкой дополнительного влагозащитного барьера между блоком кирпичной стены и теплоизоляционным блоком подтвердила возможность повышения его тепло- и влагозащищённости, а следовательно, и стен типовых зданий при реконструкции и ремонте.

С целью проверки возможности дальнейшего снижения содержания водяных паров в конструкции теплового моста при тех же исходных параметрах температуры и относительной влажности внешней среды в данной модели влагозащитный плёночный барьер перенесён на внутреннюю поверхность кирпичной стены за слой штукатурки (модель 3).

На рис. 3 показаны функциональные характеристики энергозащищённости теплового моста при изменении в геометрии модели положения влагозащитного плёночного барьера.

На рис. 3а приведено распределение температуры и относительной влажности по толщине теплового моста в сечениях по точкам 1 и 2. Видно, что температурные характеристики теплового моста по сравнению с рис. 2а мало изменились. В распределении же относительной влажности есть заметные изменения. Резкий скачок уровня влажности от начального значения до 13% происходит в самом начале кирпичного слоя, в зоне защитного барьера.

Видно, что влажность по всей глубине кирпичной стены теплового моста практически стабилизировалась на уровне 13% для каждого сечения. Вслед за этим в сечении 1 (пунктирная линия) относительная влажность монотонно растёт в теплоизоляционном блоке к наружной поверхности теплового моста до 68%.

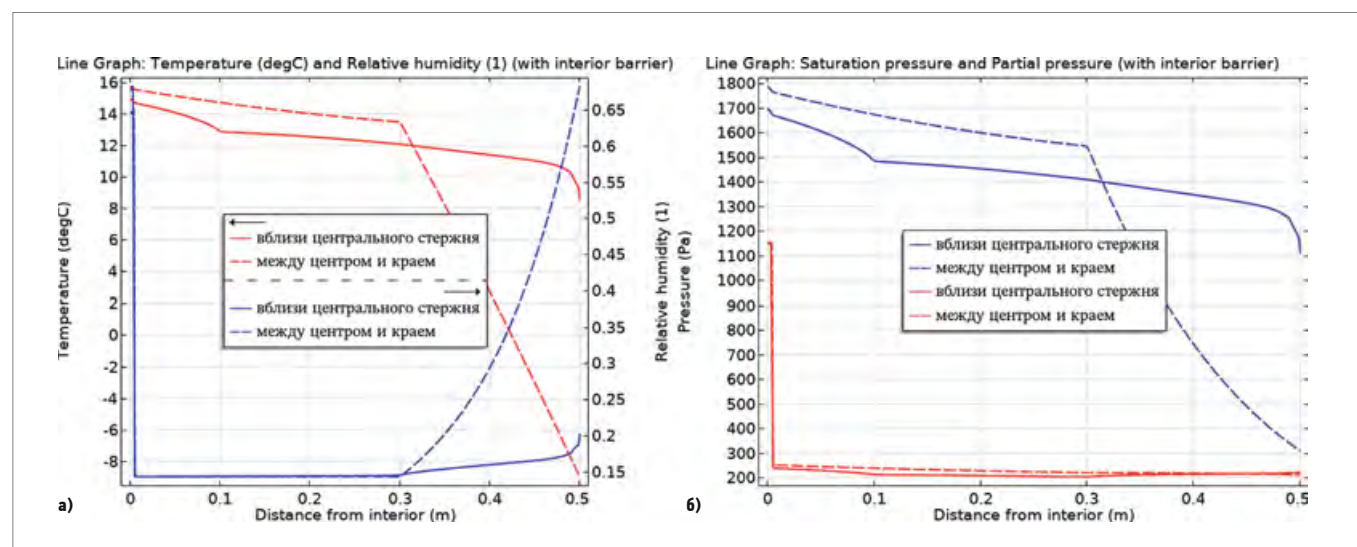


Рис. 3. Функциональные характеристики энергозащищённости теплового моста, оснащённого внутренним барьером (модель 3) а — распределение температуры и относительной влажности по толщине теплового моста в сечениях 1 и 2; б — распределение парциального давления и давления насыщенного пара по толщине теплового моста в сечениях 1 и 2

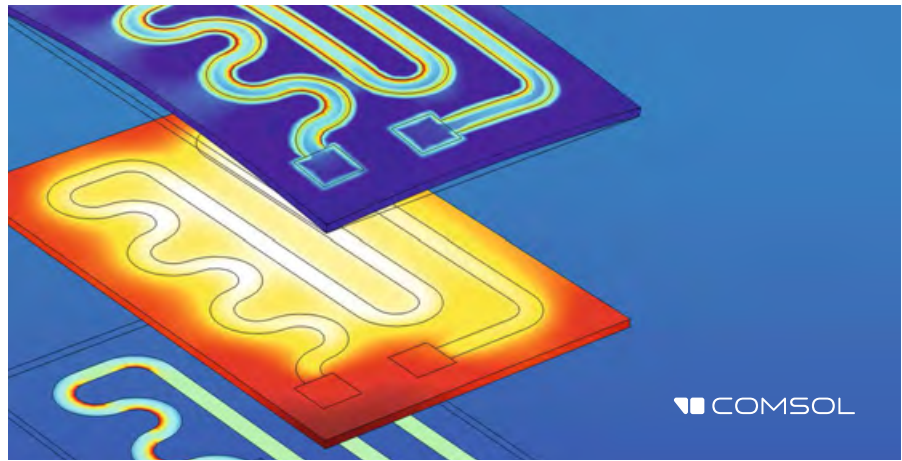
Влажность же в сечении 2 (сплошная линия) растёт гораздо медленнее и неравномерно до 20% вблизи внешней поверхности теплового моста. Причиной этого всё также служит центральный стальной стержень с высокой теплопроводностью.

На рис. 3б показаны графики распределения парциального давления (красные линии) и давления насыщенного пара (синие линии) в сечениях 1 и 2 по толщине теплового моста. Видно, что парциальное давление пара меняется скачком от значения 1150 Па на внутренней поверхности стены до 250 Па после защитного барьера. Далее в блоке кирпичной стены и блоке теплоизоляции в сечении 1 оно остаётся практически постоянным и равным 250 Па (красная пунктирная линия). Давление насыщенного пара (синяя пунктирная линия) от значения 1800 Па на внутренней поверхности стены снижается монотонно, но с разными скоростями в кирпичном слое и в слое теплоизоляции до 300 Па к внешней поверхности теплоизоляции.

В данной работе проведены исследования энергозащищённости теплового моста только для одного хорошо известного, проверенного многолетней практикой строительного материала — силикатного кирпича

Таким образом, отсутствует возможность возникновения конденсата в зоне теплоизоляции. Это подтверждается и графиком распределения относительной влажности (рис. 3а), где отмечен плавный рост относительной влажности к внешней поверхности теплоизоляции до значения 68% за счёт падения давления насыщенного пара. В сечении 2 (сплошная красная и синяя линии) под влиянием нагретого стального стержня между исследуемыми параметрами паровоздушной смеси искажаются.

В данной работе проведены исследования энергозащищённости теплового моста только для одного известного строительного материала — силикатного кирпича. В то же время сейчас выпускаются строительные материалы в широком ассортименте, и некоторые из них стали особенно популярны. Однако обеспечить комфортность проживания, долговечность и эффективность в эксплуатации возводимых из новых материалов объектов без предварительной проработки их функциональных особенностей на моделях весьма сложно. Программное обес-



печение COMSOL Multiphysics позволяет моделировать различные объекты, учитывая функциональные характеристики многих строительных материалов. Можно детально визуализировать процессы тепло- и влагопереноса в конструкционных элементах зданий, находить оптимальное сочетание прочности конструкций, энергоэффективности и комфорта.

Заключение

1. В настоящее время на значительной части типовых зданий ЖКХ проводится обновление фасадов, ремонт или реконструкция помещений. Практика обслуживания подобных объектов показала их высокие возможности модернизации при относительно малых материальных затратах. В то же время дальнейшая оптимизация ремонтных технологий, например, с целью повышения энергосбережения, возможна лишь с учётом характеристик теплообменных процессов внутри их стен при изменении температуры и влажности окружающей среды, получаемых, как правило, путём предварительного компьютерного моделирования.

2. В связи с этим предпочтительным становится более широкое использование возможностей программного обеспечения COMSOL Multiphysics для решения многих частных задач детализации функциональных характеристик элементов строительных конструкций зданий и сооружений, так как COMSOL Multiphysics полностью соответствует тестовому контролю, например, численного решения задач моделирования тепловых мостов в строительстве в рамках европейского стандарта EN ISO 10211:2007, а также может успешно решать задачи 2D- и 3D-моделирования совместного влияния тепла и влажности на функционирование строительных конструкций различной структуры из разных материалов с корректным построением моделей узлов, получением расчётной сетки и заданной точности результатов.

3. В данном исследовании выполнена комплексная оценка тепло- и влагозащи-

щённости теплового моста, применяемого при ремонте типовых зданий. Получены подтверждения важности изучения подобных процессов, так как повышение энергосбережения отдельных узлов и помещений зданий в период жизненного цикла, безусловно, отражается на достоверности моделирования эффективности их функционирования в целом в рамках технологии Building Energy Modeling (BEM), включающей параметры энергопотребления зданий в течение определённого времени эксплуатации. ●

1. Глава Минстроя: «Институт типового проектирования улучшит экономику строительных проектов» [Электр. текст]. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. Режим доступа: minstroyrf.ru. Дата обращ.: 07.05.2020.
2. BIM + BEM + CFD: как экономить 6 млн рублей в год на эксплуатации здания [Электр. текст]. Vysotskiy Consulting. Режим доступа: bim.vc. Дата обращ.: 07.05.2020.
3. Султангузин И.А., Кругликов Д.А., Яцок Т.В., Калыкин И.Д., Яворовский Ю.В., Бартенев А.И., Говорин А.В., Жигулина Е.В., Хромченко В.Г. Применение BIM-, BEM- и CFD-технологий для проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома // Журнал СОК, 2019. №3. С. 36–42.
4. Волков А.А., Челышков П.Д., Седов А.В. Энергетическое моделирование объектов строительства: монография. — М.: МГСУ, 2014. 120 с.
5. Расаков М.А., Рудакова Е.В. Влияние ориентации здания на проектные тепловые потери // Журнал СОК, 2018. №11. С. 49–51.
6. Самарин О.Д., Димитренко М.А., Семичева М.О. Оценка теплотехнической однородности фасада здания при изменении теплопроводности конструктивного слоя // Журнал СОК, 2018. №10. С. 65–67.
7. Елохов А.Е. Методики и примеры расчёта тепловых мостов // Строительство и техногенная безопасность, 2015. №1. С. 86–93.
8. Фёдоров С.В., Терехова И.А. Оценка корректности теплотехнических расчётов ограждающих конструкций методом конечных элементов // Прикладная математика и фундаментальная информатика, 2017. №1. С. 31–42.
9. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование в COMSOL Multiphysics энергопотерь сооружений ЖКХ в зависимости от условий эксплуатации // Журнал СОК, 2019. №4. С. 74–79.
10. COMSOL Multiphysics User's Guide: Heat and moisture transport in building materials. Web-source: comsol.com. Access data: May 17, 2020.
11. ISO 10211:2017. Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations. European Committee for Standardization. Web-source: iso.org. Access data: May 17, 2020.
12. COMSOL Multiphysics User's Guide: Thermal bridges in building construction — 3D Iron bar through insulation layer. Web-source: comsol.com. Access data: May 17, 2020.

References — see page 63.

Modeling in COMSOL Multiphysics of energy saving of typical housing and communal services buildings during reconstruction and repair. Pp. 44–50.

Vladimir A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Alexey S. Kochetkov**, senior lecturer; **Nikolay N. Gubanov**, senior lecturer, Russian State University of Tourism and Service

1. Glava Ministrov: “Institut tipovogo proektirovaniya uluchshit jekonomiku stroitel'nyh proektov” [Head of the Ministry of Construction: “The Institute of Standard Design will improve the economics of construction projects”]. *Ministerstvo stroitel'stva i zhilishhno-kommunal'nogo hozjajstva RF* [Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation]. Web-source: minstroyrf.ru. Access data: May 7, 2020.
2. BIM + BEM + CFD: kak jekonomit' 6 mln rublej v god na jekspluatacii zdaniya [BIM + BEM + CFD: How to save 6 million rubles per year on the operation of the building]. *Vysotskiy Consulting, LLC*. Web-source: bim.vc. Access data: May 7, 2020.
3. I.A. Sultanguzin, D.A. Kruglikov, T.V. Jacjuk, I.D. Kaljakin, Ju.V. Javorovskij, A.I. Bartenev, A.V. Govorin, E.V. Zhigulina, V.G. Hromchenkov. *Primenenie BIM-, BEM- i CFD-tehnologii dlja proektirovaniya, stroitel'stva i jekspluatacii jenergojeffektivnogo doma* [Application of BIM-, BIM- and CFD-technologies for design, construction and operation of an energy-efficient house]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 3. Pp. 36–42.
4. A.A. Volkov, P.D. Chelyshkov, A.V. Sedov. *Jenergeticheskoe modelirovanie ob'ektov stroitel'stva: monografija* [Energy modeling of construction projects: A monograph]. Moscow. MGSU [National Research Moscow State University of Civil Engineering]. 2014. 120 p.
5. M.A. Razakov, E.V. Rudakova. *Vlijanie orientacii zdaniya na proektnye teplovye poteri* [The influence of the orientation of the building on the design heat loss]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 11. Pp. 49–51.
6. O.D. Samarin, M.A. Dimitrenko, M.O. Semicheva. *Ocenka teplotehnicheskoj odnorodnosti fasada zdaniya pri izmenenii teploprovodnosti konstruktivnogo sloja* [Study of the influence of soil properties on the efficiency of heat exchangers of vertical wells for heat pump systems in COMSOL Multiphysics]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 10. Pp. 65–67.
7. A.E. Elohov. *Metodiki i primery rascheta teplovyyh mostov* [Methods and examples of calculating thermal bridges]. *Stroitel'stvo i tehnogennaja bezopasnost'* [“Construction and industrial safety” Magazine]. 2015. No. 1. Pp. 86–93.
8. S.V. Fedorov, I.A. Terehova. *Ocenka korrektnosti teplotehnicheskikh raschetov ograzhdajushih konstrukcij metodom konechnykh jelementov* [Assessment of the correctness of thermal engineering calculations of enclosing structures by the finite element method]. *Prikladnaja matematika i fundamental'naja informatika* [“Applied mathematics and fundamental informatics” Magazine]. 2017. No. 1. Pp. 31–42.
9. Suchilin V.A., Kochetkov A.S., Gubanov N.N. *Modelirovanie v COMSOL Multiphysics jenergojenergijskix potерь zhkh v zavisimosti ot uslovij jekspluatacii* [Modeling in COMSOL Multiphysics energy losses of housing and communal services, depending on operating conditions]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 4. Pp. 74–79.
10. COMSOL Multiphysics User's Guide: Heat and moisture transport in building materials. Web-source: comsol.com. Access data: May 17, 2020.
11. ISO 10211:2017. Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations. European Committee for Standardization. Web-source: iso.org. Access data: May 17, 2020.
12. COMSOL Multiphysics User's Guide: Thermal bridges in building construction — 3D Iron bar through insulation layer. Web-source: comsol.com. Access data: May 17, 2020.