



Моделирование в COMSOL Multiphysics энергопотерь сооружений ЖКХ в зависимости от условий эксплуатации

Введение

Уровень качества современного программного обеспечения при оценке функциональных показателей инженерных систем ЖКХ является одним из основных критериев достоверности получаемых результатов их состояния. Только при этом условии возможно успешное планирование ресурсов и расходов при длительной эксплуатации объектов.

Вследствие этого в эксплуатационных организациях ЖКХ при мониторинге состояния имеющегося жилищного фонда наметился интерес к технологиям информационного моделирования, позволяющего оперативно получать информацию о здании, находить в проекте возможные нестыковки и слабые места, осуществлять прогноз функционирования здания в период жизненного цикла, проверять работоспособность систем, оценивать микроклимат, определять энергетические нагрузки и проводить оптимизацию решений [1–3].

В связи с принятием актуализированной редакции СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» — СП 50.13330.2012, в задаче тепловой защиты зданий для учёта удельных тепловых потерь через тепло-технические неоднородности ограждений наиболее актуальными становятся расчёты температурных полей и тепловых потоков через такие узлы конструкции зданий, как «тепловые мосты» [4].

Существует значительное количество компьютерных программ для моделирования стационарного и нестационарного процессов теплопередачи, использующих метод конечных элементов (МКЭ) в двумерной, осесимметричной или в трёхмерной постановке. Стандартизированные требования, которым должны соответствовать программы расчёта температурных полей и тепловых потоков через ограждающие конструкции, описываются стандартом EN ISO 10211 [5]. Они подтверждаются решением тестовых задач с корректным построением моделей узлов, получением расчётной сетки и заданной точности результатов, например, для специализированных программ Heat 2, Heat 3 и Temper 3D [6, 7].

Аналогичную процедуру валидации легко осуществить для модуля Heat Transfer in Building Materials программного комплекса COMSOL Multiphysics [9]. В то же время численное моделирование средствами COMSOL Multiphysics позволяет

В эксплуатационных организациях ЖКХ при мониторинге состояния имеющегося жилищного фонда наметился интерес к технологиям информационного моделирования, позволяющего оперативно получать необходимую информацию

Рецензия эксперта на статью получена 03.04.2019 [Expert review of the article was received on April 3, 2018].

УДК 697.13. Научная специальность: 05.23.01; 05.23.03.

Моделирование в COMSOL Multiphysics энергопотерь сооружений ЖКХ в зависимости от условий эксплуатации

Владимир А. Сучилин, д.т.н., профессор; Алексей С. Кочетков, магистр; Николай Н. Губанов, магистр, Российский государственный университет туризма и сервиса (РГУТиС)

Уровень качества ПО для моделирования состояния инженерных систем ЖКХ является одним из основных критериев достоверности полученных результатов. На основе анализа ряда задач моделирования энергопотерь зданий сделаны выводы, что подобные задачи успешно решаются в пакете COMSOL Multiphysics, обеспечивающем работу с трёхмерными моделями высокой точности. Данный метод оценки энергопотерь проверен для теплового моста в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: программное обеспечение, моделирование в Comsol Multiphysics, энергопотери зданий, эксплуатация зданий, тепловой мост.

UDC 697.13. The number of scientific specialty: 05.23.01; 05.23.03.

Modeling in COMSOL Multiphysics energy losses of housing and communal services, depending on operating conditions

Vladimir A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; Alexey S. Kochetkov, graduate student; Nikolay N. Gubanov, graduate student, Russian State University of Tourism and Service (RGUTS)

The quality level of software for modeling the state of engineering systems of housing and communal services is one of the main criteria for the reliability of the results obtained. Based on the analysis of a number of modeling tasks for energy losses in buildings, it was concluded that such problems are successfully solved in the COMSOL Multiphysics package, which provides work with three-dimensional high-precision models. This method of estimating energy losses was tested for a thermal bridge depending on the operating conditions.

Key words: software, modeling in Comsol Multiphysics, energy loss of buildings, building maintenance, heat bridge.

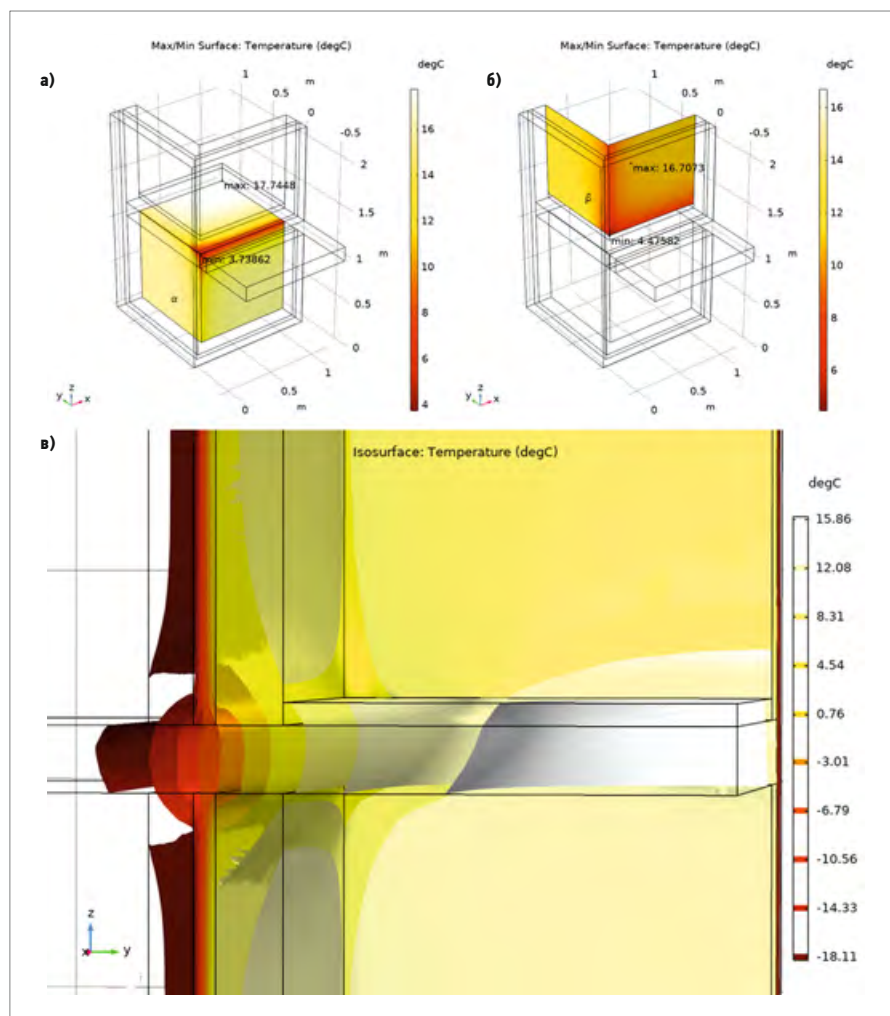


Рис. 1. Распределение температуры на поверхностях узла (а — на поверхностях α 1-го этажа, б — на поверхностях β 2-го этажа, в — в области пересечения плиты межэтажного перекрытия и стен)

исследовать и более сложные сопряжённые задачи теплопередачи и влагопереноса на трёхмерных моделях с изменяемой геометрией и параметрами с высокой точностью и наглядностью.

Кроме того, в COMSOL Multiphysics предусмотрена возможность интеграции с программным комплексом для автоматизированного проектирования Autodesk Revit, реализующим принцип информационного моделирования зданий — Building Information Modeling (BIM).

Нижеприведённая задача контроля энергопотребления сооружений жилищно-коммунального хозяйства решалась средствами программного обеспечения COMSOL Multiphysics. В основу её положено моделирование совместного переноса тепла и влаги в типовом узле конструкции здания, отделяющего два этажа от внешней среды.

Блок первого этажа включает внутренние поверхности α , блок второго этажа — поверхности β . Этажные блоки узла разделены плитой, выходящей через стену наружу как элемент балкона. Внешняя поверхность стены узла γ контактирует с воздушной средой, а между внутренней поверхностью стены блоков и внешней размещён изоляционный слой δ .

Комфортность помещения определяется значениями температуры и влажности на поверхностях α и β , а тепловые потоки возможны через поверхности α , β и γ . Необходимо проанализировать изменения температуры и влажности и явления в компонентах данного узла, такие как конденсация из-за миграции влаги наружи внутрь во время более тёплых периодов и накопление влаги за счёт внутренней конденсации вследствие диффузии пара в более холодные периоды.

Поставленная задача решалась в два этапа. На первом этапе изучалось влияние низких температур окружающей среды на тепловые потери здания. Геометрия теплового моста (узла конструкции здания) соответствовала модели Thermal Bridges in Building Construction — 3D Structure Between Two Floors [8], для которой с помощью интерфейса Heat Transfer in Building Materials решалось стационарное уравнение теплообмена:

$$Q = \nabla q; q = -k \nabla T, \quad (1)$$

где q — удельный тепловой поток, Вт/м²; k — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T — температура, К.

Условия эксплуатации объектов ЖКХ взяты из расчёта возможных температур окружающей среды в зимний период.

Наружная поверхность γ узла находится при -20°C , а внутренние поверхности α при $+20^\circ\text{C}$ и β при $+15^\circ\text{C}$, соответственно. В конструкции использованы четыре материала с различными теплофизическими свойствами, взятые из библиотеки COMSOL материалов, применяемых в строительстве зданий.

Горизонтальная плита, разделяющая два этажа строения, обладает самым высоким коэффициентом теплопроводности $k = 2,5$ Вт/(м·К). Она пересекает стену, создавая тем самым тепловой мост в конструкции узла. Суммарный конвективный тепловой поток через внутренние поверхности α и β равен потоку через внешнюю поверхность γ . По истечении некоторого времени за счёт теплопередачи материалов узла устанавливается определённое распределение температур по блокам первого и второго этажей.

Результатом исследования являются графики энергетических потерь теплового моста сооружений ЖКХ в зависимости от их условий эксплуатации. На рис. 1а и 1б показано распределение температуры на внутренних поверхностях α и β . Видно, что горизонтальная плита, разделяющая этажи объекта и являющаяся опорным элементом для пола второго этажа и балкона, проходя сквозь наружную стену, становится источником общих тепловых потерь. Распределение температуры по поверхностям α узла неравномерно от максимальной температуры $+17,75^\circ\text{C}$ в дальнем верхнем углу поверхности α первого этажа до минимальной $+3,74^\circ\text{C}$ в углу на стыке наружной стены, плиты и поверхности α первого этажа. Вся область вблизи этого угла имеет пониженную температуру (рис. 1а).

Задача контроля энергопотребления сооружений ЖКХ решалась средствами ПО COMSOL Multiphysics

Та же картина будет и для поверхностей β второго этажа объекта. Температура распределяется неравномерно, причём максимальная температура $+16,71^\circ\text{C}$ в дальнем нижнем углу поверхности β превышает начальную, что вызвано высокой теплопроводностью межэтажной плиты и передачей дополнительного тепла с нижнего этажа.

Минимальная температура $+4,48^\circ\text{C}$ будет в левом углу между плитой и поверхностью β второго этажа. Вся зона вдоль рёбер этого угла имеет пониженную температуру (рис. 1б).



Детальное представление о потерях тепла через плиту межэтажного перекрытия узла даёт распределение изотерм внутри стен узла и межэтажной плиты. В увеличенном масштабе (рис. 1в) показаны изотермы в области пересечения плиты межэтажного перекрытия и стен. Зона отрицательной температуры распространяется на межстенный изоляционный материал стены, достигая $-6,79^{\circ}\text{C}$, и вдоль плиты проходит вблизи внутренних поверхностей α и β узла с температурой около -3°C , что приводит к понижению температуры во внутренних углах между стеной и плитой до минимального значения (рис. 1а и 1б). Вследствие этого в углах узла возможна конденсация влаги из воздуха помещения и образование плесени, что напрямую влияет на здоровье человека и устойчивость здания.

Тепловые свойства строительных и изоляционных материалов обычно зависят как от температуры, так и от содержания влаги. Увеличение влажности в целом приведёт к значительным потерям тепловой энергии.

На втором этапе исследования проводилось моделирование типового теплового моста (узла конструкции здания) с целью изучения одновременного переноса тепла и влаги и оценки риска образования конденсата внутри стены.

Сопряжённый перенос тепла и влаги в строительных материалах моделируется с помощью интерфейсов Heat Transfer in Building Materials и Moisture Transport in Building Materials.

Использовалась также модель Condensation Risk in a Wood-Frame Wall [9].

При этом строительные материалы рассматриваются как специфические ненасыщенные 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. Положения стандарта EN 15026, подтверждённые в ГОСТ 32494–2013 [10], касаются явлений переноса влаги в строительных материалах в соответствии с уравнением переноса, установленным в качестве стандарта и учитывающим перенос жидкости капиллярными силами, диффузию пара из-за градиента давления пара, накопление влаги и эффект скрытой теплоты из-за диффузии пара:

$$G = \nabla[\xi D_w \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi p_{\text{sat}})], \quad (2)$$

где ξ — удельная влагоёмкость, $\text{кг}/\text{м}^3$; φ — относительная влажность; D_w — коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; δ_p — коэффициент паропроницаемости, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2\cdot\text{Па})$; p_{sat} — давление насыщения пара, Па .

Эффект скрытой теплоты, вызванный конденсацией пара, добавляет в правую часть уравнения теплообмена (1) дополнительное слагаемое:

$$q = -k \nabla T - L_v \delta_p \nabla(\varphi p_{\text{sat}}), \quad (3)$$

в данной формуле L_v — скрытая теплота испарения, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Условия эксплуатации объектов ЖКХ взяты с учётом возможных температур окружающей среды в весенний период. Наружная поверхность γ узла находится при 0°C и относительной влажности 0,8 (80%), а внутренние поверхности: α — при $+20^{\circ}\text{C}$, β — при $+15^{\circ}\text{C}$. В конструкции использованы те же четыре материала с различными характеристиками тепло- и влагопереноса. Риск конденсации в стене оценивается посредством совместного расчёта переноса тепла и влаги. Кроме того, оценивается зависимость тепловых свойств от влажности.

В течение некоторого времени, за счёт теплопередачи материалов, а также действия капиллярных сил и переноса пара путём диффузии, устанавливается определённое распределение температуры и влажности по блокам первого и второго этажей.

В углах рассматриваемого узла возможна конденсация влаги из воздуха помещения и образование плесени, что напрямую влияет на здоровье человека и устойчивость здания. Тепловые свойства строительных и изоляционных материалов обычно зависят как от температуры, так и от содержания влаги



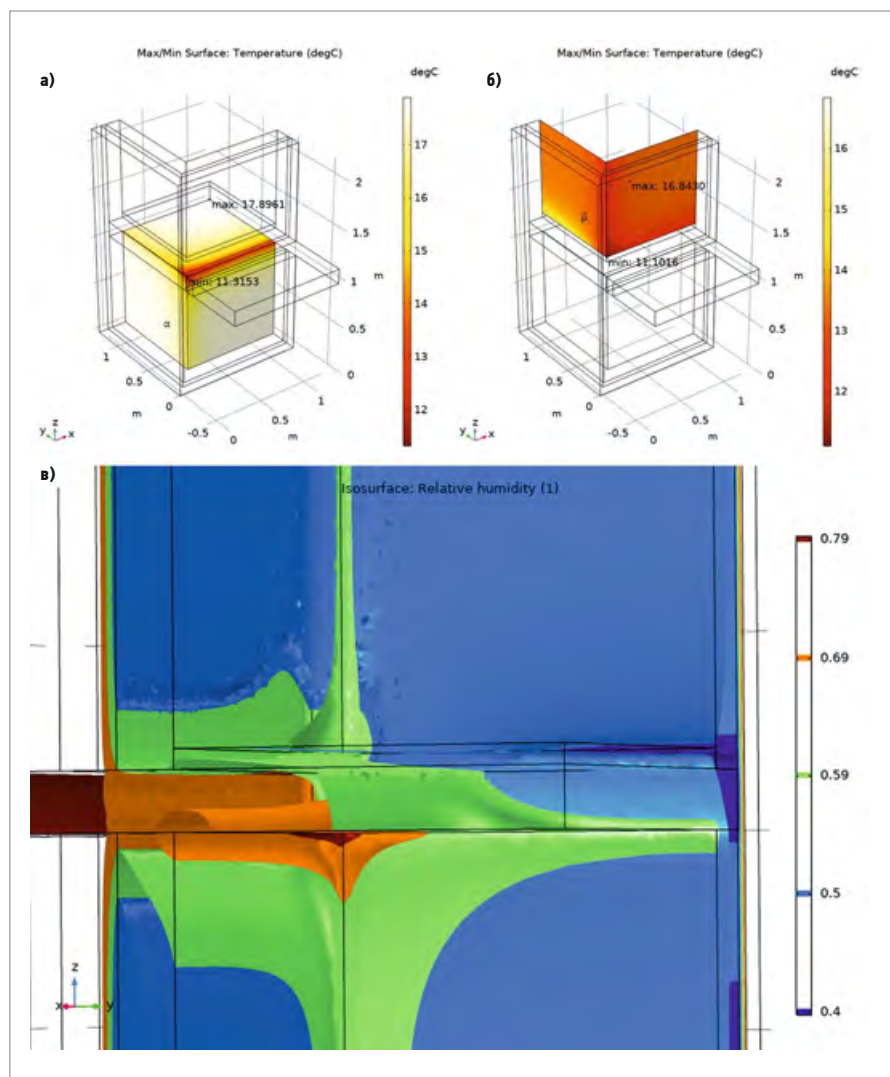


Рис. 2. Распределение на поверхностях узла при совместном влиянии тепла и влаги (а — температуры на поверхностях α первого этажа, б — температуры на поверхностях β второго этажа, в — относительной влажности на поверхностях α и β в области пересечения плиты межэтажного перекрытия и стен)

Результатом исследования являются графики энергетических потерь теплового моста сооружений ЖКХ в зависимости от совместного влияния тепла, влаги и условий эксплуатации. Показано (рис. 2а и 2б), что горизонтальная плита, разделяющая этажи объекта, также является источником общих тепловых потерь. Температура по поверхностям α узла распределена неравномерно от максимальной температуры $+17,9^\circ\text{C}$ в дальнем верхнем углу поверхности α первого этажа до минимальной $+11,32^\circ\text{C}$ в углу на стыке наружной стены, плиты и поверхности α первого этажа. Вся зона вдоль горизонтального ребра этого угла имеет пониженную температуру (рис. 2а).

Распределение температуры поверхностей β второго этажа объекта следующее. Максимальная температура поверхностей β $+16,84^\circ\text{C}$ в дальнем нижнем углу превышает начальную, что вызвано высокой теплопроводностью межэтажной плиты, а минимальная температура $+11,1^\circ\text{C}$ в левом углу между плитой и поверхностью β второго этажа. Вдоль ребер

этого угла проходит область пониженной температуры (рис. 2б).

На рис. 2в показан в увеличенном масштабе фрагмент графика поверхностей постоянной величины для относительной влажности воздуха в области пересечения плиты межэтажного перекрытия и стен. Видно, что относительная влажность воздуха на внутренних поверхностях α и β узла распределена неравномерно. Большая часть поверхностей имеет относительную влажность в пределах

0,5–0,6. Однако в зонах контакта поверхностей с разделительной межэтажной плитой относительная влажность равна 0,69, а в угловой зоне достигает 0,79, что практически равно относительной влажности наружного воздуха. Можно предположить, что конденсация влаги в этой зоне присутствует и внутри стены. Следует вывод о необходимости дополнительных мероприятий по защите данных зон от риска конденсации влаги.

В связи с полученным результатом дополнительно проведено моделирование и исследование задачи устранения риска влажности в углу между межэтажной плитой и поверхностями α и β узла. В модель геометрии добавлены конструктивные элементы в виде треугольных призм сверху и снизу межэтажной плиты, как внутри объекта, так и снаружи, выполненные из материала с высокой влагоустойчивостью.

Получены результаты: на рис. 3а в увеличенном масштабе показаны изотермы в области пересечения плиты межэтажного перекрытия и стен, отражающие возможное влияние добавленных изоляционных элементов на снижение тепловых потерь в данном узле. Видно, что контур с температурой $2,69^\circ\text{C}$ проходит через межстенный изоляционный материал, а температура в плите на уровне стены внутренней поверхности узла $9,84^\circ\text{C}$. При этом в углах в зоне установки изоляционных конструктивных элементов температура примерно равна $15,2^\circ\text{C}$, что устраняет риск конденсации влаги.

На рис. 3б показан в увеличенном масштабе фрагмент графика поверхностей постоянной величины для относительной влажности воздуха на поверхностях α и β первого и второго этажей воздуха в области пересечения с плитой межэтажного перекрытия. Видно, что относительная влажность воздуха на внутренних поверхностях узла распределена неравномерно. Большая часть поверхностей имеет относительную влажность в пределах 0,4–0,49.

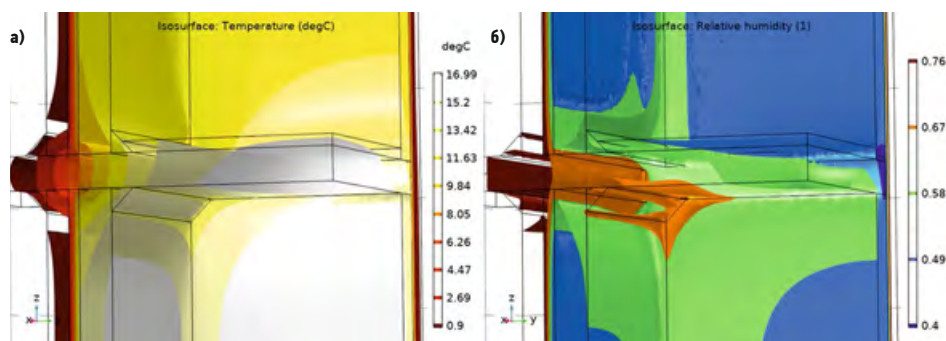


Рис. 3. Распределение на поверхностях узла с дополнительными конструктивными элементами при совместном влиянии тепла и влаги (а — температуры на поверхностях α и β первого и второго этажей, б — относительной влажности на поверхностях α и β)

Однако в зонах контакта поверхностей с разделительной межэтажной плитой относительная влажность равна 0,67, что ниже предыдущего значения (рис. 2в). Можно предположить, что дополнительные изоляционные элементы позволили снизить риск конденсации влаги в этой зоне узла. Тем самым подтверждается возможность снижения риска конденсации влаги на поверхностях подобных узлов путём несложных конструктивных решений при необходимости подбора их физико-технических параметров.

Детальный анализ риска конденсации влаги в стене при совместном действии тепла и влажности воздуха позволяют провести графики рис. 4а и б.

На рис. 4а показаны графики распределения температуры внутри стены в зонах пересечения её межэтажной плитой. За начало отсчёта (0 м) берётся внутренняя

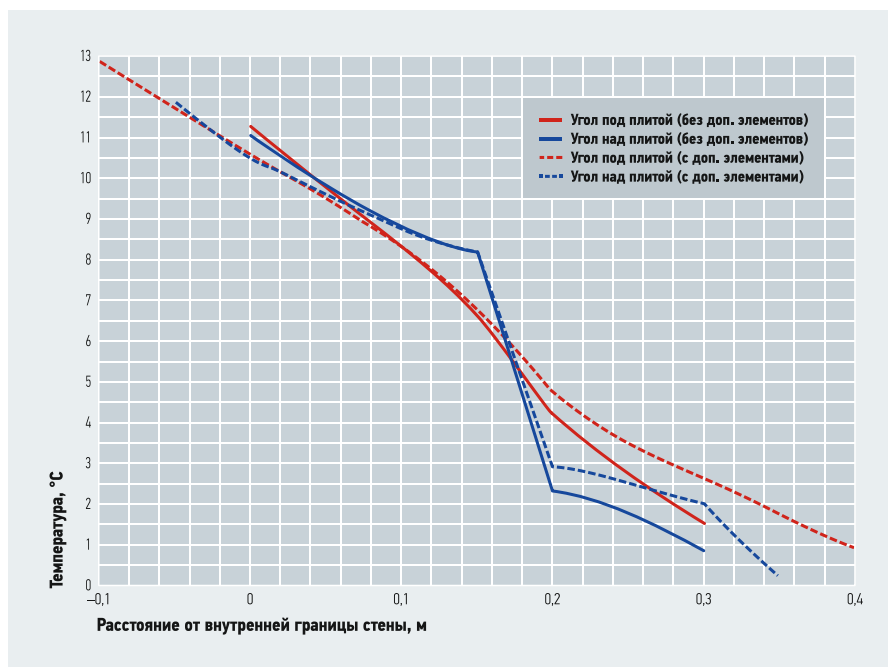
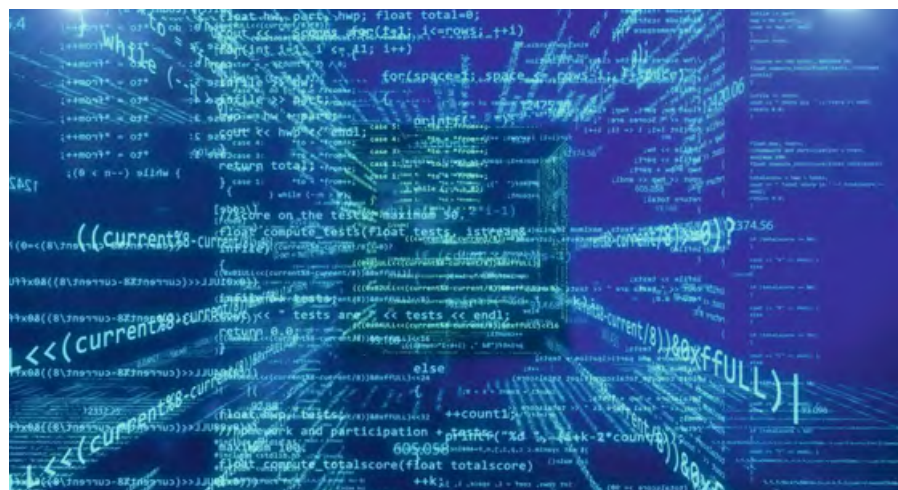


Рис. 4а. Распределение температуры в области пересечения стены межэтажной плитой (первого и второго этажей)



граница со стеной поверхностей α и β на первом и втором этажах. Толщина стены без дополнительных изоляционных элементов 0,3 м. В углу под плитой от внутренней до наружной поверхности стены температура меняется от 11,2 до 1,8°C (сплошная красная линия). В углу над плитой без дополнительных изоляционных элементов температура меняется от 11,1 до 1°C (сплошная синяя линия).

При условии установки дополнительных изоляционных элементов, то есть с увеличением общей толщины стены в этой зоне, температура меняется от внутренней до наружной поверхности стены от 12,9 до 1,1°C (пунктирная красная линия). Также с дополнительными изоляционными элементами над плитой температура меняется от 11,8 до 0,3°C (пунктирная синяя линия).

Видно, что даже незначительная модернизация узла может привести к снижению потерь тепла: температура в помещении повышается примерно на 10%

и соответственно снижается теплопередача через стену в окружающую среду.

На рис. 4б показаны графики распределения относительной влажности внутри стены узла в зонах пересечения её межэтажной плитой. Начало отсчёта (0 м) также внутренняя граница со стеной поверхностей α и β на первом и втором этажах. Толщина стены без дополнительных изоляционных элементов — 0,3 м. В углу под плитой от внутренней до наружной поверхности стены влажность меняется от 0,82 до 0,75 (сплошная красная линия). Следует отметить, что влажность в углу под плитой даже выше влажности наружного воздуха. Это возможно за счёт конденсации влаги при совместном действии влажности воздуха и теплоты в этой зоне. По графику можно судить, какой слой материала стены интенсивнее пропускает влагу. В углу над плитой от внутренней до наружной поверхности стены без дополнительных изоляционных элементов относительная влажность

меняется от 0,62 до 0,76 (сплошная синяя линия). Влажность на втором этаже значительно ниже.

При установке дополнительных изоляционных элементов относительная влажность на первом этаже в области межэтажной плиты изменяется от 0,76 до 0,74 с некоторым повышением в стене после слоя межстенного изоляционного материала до 0,77 (красный пунктир). На втором этаже относительная влажность меняется от 0,6 до 0,77 (синий пунктир). Изменения неравномерны, легко оценить, как пропускает влагу каждый из материалов стены. Видно, что дополнительные изоляционные элементы в углах между стеной и плитой узла приводят к снижению риска конденсации влаги.

Для дополнительного снижения риска внутренней конденсации обычной практикой является применение пароизоляции. В данной модели исследовалось также применение пароизоляционной плёнки, разделяющей межстенный изоляционный слой и дополнительные конструктивные элементы внутренней изоляции. Это уменьшает значение влажности в зонах, прилегающих к межэтажной плите на 7–8%.

Таким образом, получены необходимые данные для формирования выводов о возможных причинах значительной потери тепловой энергии в объектах ЖКХ, а применение COMSOL Multiphysics позволяет успешно решать сложные инженерные задачи, связанные с сервисом жилищного фонда, используя достижения информационных технологий, оперативно определять и устранять проблемные места функционирования жилого фонда в период жизненного цикла.

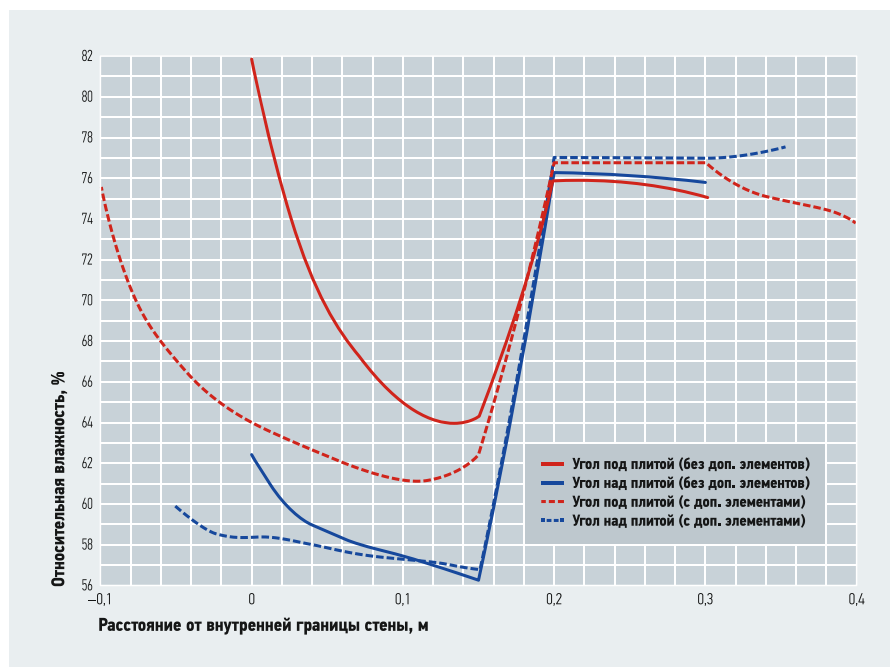


Рис. 46. Распределение относительной влажности в области пересечения стены межэтажной плитой (первого и второго этажей)

Заключение

1. Современное программное обеспечение для численного моделирования и исследования технологических процессов и технических систем непрерывно совершенствуется, в связи с этим в настоящее время задачи оценки функционирования инженерных систем и, в частности, энергопотребления зданий ЖКХ могут успешно решаться в программном обеспечении COMSOL Multiphysics на трёхмерных моделях сопряжённых процессов тепло- и влагопереноса с изменяемой геометрией и параметрами с высокой точностью и наглядностью. Кроме того, в COMSOL Multiphysics предусмотрена возможность интеграции с программным комплексом для автоматизированного проектирования Revit, реализующим принцип информационного моделирования зданий Building Information Modeling (BIM).

2. Повышение точности определения реальных показателей теплопроводности и влагостойкости элементов конструкции зданий ЖКХ на основе пакета COMSOL Multiphysics, соответствующего требованиям стандарта EN ISO 10211, позволяет оптимизировать решения задач по снижению потерь тепловой энергии в различных климатических условиях эксплуатации в период жизненного цикла.

3. При изучении влияния низких температур окружающей среды на тепловые потери конструктивного узла использовался интерфейс Heat Transfer in Building Materials, специально разработанный для моделирования переноса тепла в строительных материалах, и решалось стационарное уравнение теплообмена, отражающее свойства материалов узла в формуле теплового потока через элементы кон-

струкции. Показана важность предварительного моделирования функциональных характеристик материалов и структурного исполнения элементов узла, исключающего возможность образования на внутренних поверхностях узла областей пониженной температуры, что может вызвать образование локальных очагов аккумуляции влаги.

Современное ПО для численного моделирования и исследования технологических процессов и технических систем непрерывно совершенствуется, в связи с этим в настоящее время задачи оценки функционирования инженерных систем и, в частности, энергопотребления зданий ЖКХ могут успешно решаться в программном обеспечении COMSOL Multiphysics

4. Установлено, что для объективной оценки потерь тепловой энергии здания необходимо изучение изотермических контуров элементов конструкции при распределении тепловой энергии внутри помещений, показывающих внутренние температурные зоны в зависимости от теплопроводности материалов, назначения и взаимного положения элементов в структуре узла при изменении условий внешней окружающей среды.

5. При изучении одновременного влияния переноса тепла и влаги на энергетические потери конструктивного узла и оценки риска образования конденсата внутри стены использовались интер-

фейсы Heat Transfer in Building Materials и Moisture Transport in Building Materials и нормы стандарта EN 15026, касающиеся явления переноса влаги в строительных материалах в соответствии с уравнением переноса, содержащимся в стандарте и учитывающим перенос жидкости капиллярными силами, диффузию пара из-за градиента давления пара, накопление влаги и эффект скрытой теплоты из-за диффузии пара. Показано, что в углу первого этажа, в зоне соединения межэтажной плиты и стены влажность практически равна относительной влажности наружного воздуха. Очевидно некоторое распределение влажности и внутри стены, а также присутствие риска конденсации влаги.

6. Проверена возможность снижения потерь тепла в узле и риска конденсации влаги на элементах стены и внутри её конструктивными методами. Проведено моделирование и получены результаты: при использовании дополнительных конструктивных элементов в области межэтажной плиты снаружи и внутри помещения потери тепла снижаются примерно на 9–10%; применение пароизоляционной плёнки, разделяющей межстенный изоляционный слой и дополнительные конструктивные элементы внутренней изоляции, уменьшает значение влажности в зонах, прилегающих к межэтажной плите, на 7–8 %.

1. Малявина Е.Г., Самарин О.Д. Строительная теплофизика и микроклимат зданий: Учеб. — М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2018. 288 с.
2. Глазунов Н.А. Влияние поправочного коэффициента на величину тепловых потерь в угловых помещениях: В сб. «Энергосбережение и рациональное использование ресурсов в инженерных системах зданий и сооружений». — М.: МГСУ, 2017. С. 6–9.
3. Разаков М.А., Рудакова Е.В. Влияние ориентации здания на проектные тепловые потери // Журнал С.О.К., 2018. №11. С. 49–51.
4. Самарин О.Д., Димитренко М.А., Семичева М.О. Оценка теплотехнической однородности фасада здания при изменении теплопроводности конструктивного слоя // Журнал С.О.К., 2018. №10. С. 65–67.
5. European Committee for Standardization. Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations (ISO 10211:2017). Web-source: www.iso.org. Access data: March 25, 2019.
6. Елохов А.Е. Методики и примеры расчёта тепловых мостов // Строительство и техногенная безопасность, 2015. №1. С. 86–93.
7. Фёдоров С.В., Терехова И.А. Оценка корректности теплотехнических расчётов ограждающих конструкций методом конечных элементов // Прикладная математика и фундаментальная информатика, 2017. Т. 4. №1. С. 31–42.
8. COMSOL Multiphysics User's Guide: Thermal bridges in building construction — 3D Structure between two floors. Web-source: comsol.com. Access data: March 10, 2019.
9. Bost C. How to model heat and moisture transport in porous media with COMSOL. Web-source: comsol.com. Access data: March 10, 2019.
10. ГОСТ 32494–2013. Метод математического моделирования температурно-влажностного режима ограждающих конструкций. — М.: Стандартинформ, 2014. 26 с.

References — see page 95.

Modeling in COMSOL Multiphysics energy losses of housing and communal services, depending on operating conditions. Pp. 74–79.

Vladimir A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; Alexey S. Kochetkov, graduate student; Nikolay N. Gubanov, graduate student, Russian State University of Tourism and Service (RGUTS)

1. Maljavina E.G., Samarin O.D. *Stroitel'naja teplofizika i mikroklimat zdaniy: Ucheb* [Building thermal physics and microclimate of buildings: A textbook]. Moscow. *Izd-vo MISI-MGSU* [Publishing House of National Research University Moscow State of Civil Engineering]. 2018. 288 p. [In Russian]
2. Glazunov N.A. *Vliyanie popravocnogo koefitsienta na velichinu teplovykh poter' v uglovyyh pomeshcheniyah: V sb. "Jenergobezrezhenie i racional'noe ispol'zovanie resursov v inzhenernykh sistemah zdaniy i sooruzhenij"* [The influence of the correction factor on the amount of heat losses in the corner rooms: In the col. vol. "Energy saving and rational use of resources in engineering systems of buildings and structures"]. Moscow. *Nacional'nyy issledovatel'skij Moskovskij gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet (NIU MGSU)* [National Research University Moscow State of Civil Engineering]. 2017. Pp. 6–9. [In Russian]
3. Razakov M.A., Rudakova E.V. *Vliyanie orientatsii zdaniya na proektnye teplovye poteri* [Influence of building orientation on design heat losses]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 11. Pp. 49–51. [In Russian]
4. Samarin O.D., Dimitrenko M.A., Semicheva M.O. *Ocenka teplotekhnicheskoy odnorodnosti fasada zdaniya pri izmenenii teploprovodnosti konstruktivnogo sloja* [Evaluation of thermal uniformity of the facade at changing thermal conductivity of the structural layer]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (S.O.K.)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 10. Pp. 65–67. [In Russian]
5. European Committee for Standardization. Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations (International Organization for Standardization [ISO] 10211:2017). Web-source: www.iso.org. Access data: March 25, 2019.
6. Elohov A.E. *Metodiki i primery rascheta teplovykh mostov* [Methods and examples of the calculation of thermal bridges]. *Stroitel'stvo i tehnogennaya bezopasnost'* ["Construction and technological safety" Magazine]. 2015. No. 1. Pp. 86–93. [In Russian]
7. Fedorov S.V., Terehova I.A. *Ocenka kornektnosti teplotekhnicheskikh raschetov ograzhdajushhih konstrukcij metodom konechnykh jelementov* [Evaluation of the correctness of thermal calculations of enclosing structures using the finite element method]. *Prikladnaja matematika i fundamental'naja informatika* ["Applied Mathematics and Fundamental Informatics" Magazine]. 2017. Vol. 4. No. 1. Pp. 31–42. [In Russian]
8. COMSOL Multiphysics User's Guide: Thermal bridges in building construction — 3D Structure between two floors. Web-source: comsol.com. Access data: March 10, 2019.
9. Bost C. How to model heat and moisture transport in porous media with COMSOL. Web-source: comsol.com. Access data: March 10, 2019.
10. GOST [State industry standard of Russia] 32494–2013. *Metod matematicheskogo modelirovaniya temperaturno-vlazhnostnogo rezhima ograzhdajushhih konstrukcij* [The method of mathematical modeling of temperature and humidity regime of enclosing structures]. Moscow. *Standartinform* [Federal State Unitary Enterprise "Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology And Conformity Assessment" (Standartinform)]. 2014. 26 p. [In Russian]