

УДК 532.546:536.24:004.942

CFD- МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА МЕЖДУ ПОРИСТЫМИ СТРОИТЕЛЬНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ И ПАРОВОЗДУШНОЙ СРЕДОЙ

Круковский П.Г., доктор техн. наук, Полубинский А.С., канд. физ-мат. наук,

Тадля О.Ю., канд. техн. наук, Коваленко В.Н., канд. техн. наук

Институт технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2, а, Київ, 03680, Україна

Розроблена CFD-модель в програмному середовищі ANSYS-FLUENT для моделювання спряженого тепловологопереносу між твердою поверхнею огороження приміщення і пароповітряним середовищем прошарку з урахуванням радіаційного та конвективного теплообміну. Спряжений тепловологоперенос реалізований за допомогою спеціально створених функцій, що розширило розрахункові можливості програми ANSYS-FLUENT. Отримані розподіли температур та абсолютних вологостей в огорожуючій конструкції з достатньою точністю співпадають з експериментальними даними.

Разработана CFD-модель в программной среде ANSYS-FLUENT для моделирования сопряженного тепловологопереноса между твердой поверхностью ограждения помещения и паровоздушной средой прослойки с учетом радиационного и конвективного теплообмена. Сопряженный тепловологоперенос реализован с помощью специально созданных функций, что расширило расчетные возможности программы ANSYS-FLUENT. Полученные распределения температур и абсолютных влажностей в ограждающей конструкции с достаточной точностью совпадают с экспериментальными данными.

A CFD-model to simulate the conjugate heat and moisture transfer between the building envelope surface and internal air-steam-medium layer with radiation and convective heat transfer. was developed with ANSYS-FLUENT software. The conjugate heat and moisture transfer is realized using of specially created function, that expanded calculated capabilities of ANSYS-FLUENT software. Obtained temperature and absolute humidity distributions with sufficient accuracy correspond to the experimental data.

Библ. 10, рис. 2, табл. 1.

Ключевые слова: пористый строительный материал, тепловологоперенос, CFD-моделирование.

a – соотношение между влагосодержанием и абсолютной влажностью согласно кривой сорбции для данного материала;

D – коэффициент диффузии пара в воздухе, м²/с;

D_w – влагопроницаемость (агрегатное состояние – вода) в материале, кг/(м·с·%);

H – энтальпия, кДж/кг;

h_v – теплота парообразования, 2,5·10⁶ Дж/кг;

k – степень интенсивности поглощения (либо выделения) влаги из пара паровоздушной смеси, кг/(м·с·Па);

m – концентрация (доля паров воды во влажном воздухе), кг/кг;

p – парциальное давление, Па;

P_s – статическое давление, Па;

S_m – источник массы, кг/(м²·с);

v – скорость, м/с;

w – влагосодержание в материале, кг/кг;

x – координата, м;

y – координата, м;

λ_w – теплопроводность влажного материала, Вт/(м·С);

ρ – плотность, кг/м³;

τ – время, с.

Нижние индексы:

m – масса;

s – статическое;

v – параметр относится к пару;

w – параметр относится к влаге.

Совместные расчеты теплового и влажностного состояния помещения и ограждающих

конструкций позволяют избежать нарушения комфортных условий человека в помещении,

образования зон с повышенной влажностью на поверхности или внутри ограждающих конструкций и ухудшения их теплозащитных свойств.

Поскольку здания представляют собой сложные системы, они могут быть изучены на различных уровнях (здание в целом, отдельные помещения, типичные строительных конструкции и строительные материалы). В зависимости от поставленной цели и дальнейшего применения, процессы тепло-, воздухо- и влагопереноса в зданиях моделируются с помощью различных подходов и математических моделей, которые активно разрабатываются в настоящее время.

Сложность математического описания процессов влагообмена в ограждающих конструкциях помещений обусловлена множеством факторов. Это и составной характер ограждающих конструкций, переменность граничных условий как снаружи помещения, так и внутри его, неизотермичность и нестационарность процессов во времени, изменение агрегатного состояния влаги, которая находится в ограждении, нелинейность расчетных характеристик и т.д. Сложность также заключается в том, что некоторые, широко распространенные компьютерные программы, не имеют возможности решать определенные задачи, либо требуются дополнительные усилия со стороны пользователей. Например, в программе ANSYS-FLUENT [1] подобной проблемой является решение задач сопряженного тепло- и влагопереноса через конструкции, когда необходимо учесть как перенос влаги в самом материале конструкции, так и радиационный и конвективный перенос во влажном воздухе, в котором находится данная конструкция (например, помещение или воздушная прослойка). Проблема состоит в том, что для радиационного теплообмена на твердых поверхностях необходимо наличие непроницаемой стенки, однако в таком случае невозможно решать задачу переноса массы через такую поверхность.

Для решения этой проблемы в [2] в среде программы ANSYS-FLUENT предложено использовать совместное решение CFD-модели помещения и упрощенной влажностной моде-

ли ограждения в постановке с сосредоточенными параметрами. В модели с сосредоточенными параметрами рассчитывается коэффициент массоотдачи и влагосодержание (массовая доля пара) на каждом шаге по времени для использования в расчете CFD-модели. Влагосодержание в граничных ячейках воздуха представляется как поток влаги через границу области решения «воздух помещения – ограждение» с помощью «User Defined Scalar» (UDS) [1], который использует это значение как граничное условие. Вычисления для накопления влаги в стенке выполняются в конце каждого временного шага расчета CFD-модели для теплового состояния и движения воздуха помещения. Этот подход реализован с помощью «User defined function» (UDF) [1], которая определяет плотность влажного воздуха и коэффициент диффузии в модели. Т.о., на каждом шаге по времени две модели обмениваются результатами расчетов. По мнению авторов, такое взаимодействие позволяет не только получать полную картину теплового и влажностного полей в воздухе помещения, но и с небольшими усложнениями модели учитывать влияние влажностного состояния ограждений помещения на влажностное состояние воздуха с достаточной точностью. Недостатком этого подхода является допущение изотермичности рассматриваемой поверхности пористой строительной конструкции, через которую идет тепловлагоперенос, что в реальности встречается редко. В [3] ограждающие конструкции помещения представлены в виде неподвижной жидкости с соответствующими свойствами материалов. Диффузионная модель в стене имеет два значения влагосодержания на противоположных границах конструкции, а внутри стены предполагается линейное распределение влагосодержания между этими граничными значениями. Для моделирования влагообмена между двумя жидкостями (воздухом и стеной) авторам пришлось задать непроницаемую стенку, – барьер, который позволяет им взаимодействовать с помощью специальных функций. Этот барьер разделен на две половины: с одной стороны он контактирует с воздухом, с другой – со стенкой. Обе стороны имеют одни и те же геометрические координаты. Таким образом,

авторы создали функцию, которая переносит массовый поток влаги через границу с помощью функций, обеспечивающих влагообмен между ячейками по обе стороны этого барьера. Однако, авторы указывают на то, что данный подход нуждается в проверке на натурном эксперименте, который позволит учесть нестационарность процессов тепловлагопереноса и радиационный теплообмен между поверхностями ограждений помещения.

Для обеспечения получения адекватных результатов важно, чтобы все входные параметры (т.е. граничные условия, свойства материалов и т.д.) были хорошо известны или измерены и чтобы влияние неконтролируемых факторов было сведено к минимуму. Это часто невозможно в случае с натурными измерениями, где многие внешние воздействия неизвестны или трудно измеряемы. Поэтому большинство экспериментальной работы по изучению процессов влагопереноса выполняется в хорошо контролируемых условиях, то есть в климатиче-

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_w \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_w \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[k \cdot (a \cdot m - (w + m)) \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \cdot (a \cdot m - (w + m)) \frac{\partial P}{\partial y} \right]; \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_w \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_w \frac{\partial T}{\partial y} \right] + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left[k \cdot (a \cdot m - (w + m)) \frac{\partial P}{\partial x} \right] + h_v \frac{\partial}{\partial y} \left[k \cdot (a \cdot m - (w + m)) \frac{\partial P}{\partial y} \right]; \quad (2)$$

$$\frac{\partial m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D \frac{\partial m}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[k \cdot (a \cdot m - (w + m)) \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \cdot (a \cdot m - (w + m)) \frac{\partial P}{\partial y} \right]; \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v) = S_m; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v) = - \frac{\partial}{\partial x} P_s - \frac{\partial}{\partial y} P_s. \quad (5)$$

Уравнение (1) описывает влагоперенос в материале ограждающей конструкции с учетом перехода части пара из паровоздушной смеси во влагу. (2) – передачу теплоты в материале с учетом изменения его влажности, (3) – диффузию пара в паровоздушной смеси и уход части пара во влагу материала, (4) и (5) представляют собой уравнение неразрывности и движения. В пористой среде переход из пара во влагу и обратно, предложенный авторами, учитывается третьим и четвертым слагаемыми в правых частях уравнений (1)–(3). Модель (1)–(5) описывает как процесс отдачи пара паровоздушной смесью в строитель-

ских камерах или на специально построенном испытательном оборудовании.

Однако, как указано в [4], не всегда экспериментальные исследования в климатических камерах на образцах уменьшенного размера могут правильно описывать влажностные процессы, происходящие в ограждающих конструкциях помещений реальных размеров. Отмечено, что распределение относительной влажности в помещении может значительно меняться вдоль внутренних поверхностей, что влияет на передачу влаги от воздуха в помещении к материалу поверхности ограждения, и это не дает возможности правильно оценить накопление влаги поверхностями ограждающих конструкций.

Разработка модели тепловлагопереноса в материале в сопряженной постановке с влажным воздухом около его поверхности и ее проверка на образце газобетона приведена детально в [5]. Двухмерная модель описана системой следующих уравнений:

ный пористый материал ограждающей конструкции, который увлажняется, так и наоборот. Паропроницаемость в материале в уравнениях (1)–(3) учитывается выражением $k \cdot (a \cdot m - (w + m))$, где коэффициент a вычисляется из кривой сорбции материала и является функцией влагосодержания и абсолютной влажности. В стационарном режиме, $a \cdot m = (w + m)$, т.е. отсутствует приток влаги и пара в материал, что является физическим для этого режима.

Разработанная модель сопряженного тепло- и массопереноса в строительном материале была опробована при моделировании процесса

увлажнения блока газобетона в лабораторных изотермических условиях, и показала достаточное совпадение расчетных результатов и экспериментальных данных [5]. Однако, в естественных условиях увлажнения ограждающих конструкций здания массоперенос всегда сопровождается конвективными и радиационными потоками тепла, которые оказывают значительное влияние.

Проверить работоспособность предложенной модели в программе ANSYS-FLUENT на реальной ограждающей конструкции в натурных условиях и является целью настоящей работы.

Предложенная модель позволит выполнять правильный учет особенностей сопряженного тепло- и массопереноса в ANSYS-FLUENT с учетом радиационного и конвективного теплообмена и проверить это моделированием реальной ограждающей конструкции в естественных условиях. Верификация модели проведена путем моделирования сопряженного тепло- и массопереноса через наружную ограждающую конструкцию экспериментального дома в г. Гренобль [6].

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие работы:

1. Создание модели тепловлажностного

состояния наружной ограждающей конструкции исследуемого дома, представляющей собой многослойную пористую стенку и воздушную прослойку между стенкой и наружным покрытием;

2. Сравнение результатов расчетов с имеющейся экспериментальной информацией.

Ниже приведено описание экспериментальных исследований объекта в естественных условиях. Целью исследований, изложенных в [6-8], было изучение недопущения конденсации влаги в домах с многослойными ограждениями из дерева с утеплением из целлюлозной ваты. Экспериментальные исследования проводились в г. Гренобле, Франция в феврале 2012 года в деревянном доме 20 м³ (размеры 4.56×4.55×2.41м) с многослойными наружными ограждениями (конструкция стены представлена на рис. 1).

Температура воздуха в помещении экспериментального дома поддерживалась системой отопления на уровне 20 °С. Температура окружающей среды оставалась отрицательной все время проведения эксперимента, солнечная радиация измерялась на восточной и южной стороне дома и достигала 600 Вт/м². В доме была оборудована система вентиляции, кратность воздухообмена оценивалась на уровне 0,14 1/час.



Рис. 1. Фото экспериментального дома слева, и многослойная конструкция стены справа [6]. Цифрами показаны номера датчиков влажности и температуры.

Для уменьшения влияния теплотерь в грунт на тепловое состояние наружных ограждений, пол дома был поднят на 0,57 м над уровнем земли и тщательно изолирован. В структуре ограждающей конструкции внутренний слой паробарьера (рис. 1) обладает свойством полной непроницаемости для пара и воды, а наружный

дождевой экран не может пропускать воду, но может пропускать пар из окружающей среды. Скорость восходящего конвективного потока в воздушной прослойке принята 0,5 м/с и его течение ламинарное (согласно данным [6]). Стены дома были оснащены термогидрометрами по толщине конструкции и датчиками теплового

потока. Кроме исследования непосредственно теплового и влажностного режима дома, проводились многочисленные исследования паропроницаемости материалов, используемых в ограждающих конструкциях, влияния вентиляции на влажностный режим помещения и т.д. Более детально исходные данные, процесс проведения эксперимента, используемое оборудование описано в [6-8]. Изотермы сорбции материалов стен, используемых в экспериментальном доме, приведены в [9].

Экспериментальные исследования проводились следующим образом. На протяжении трех месяцев до начала проведения эксперимента поддерживались постоянные тепловые и влажностные условия в доме. Количество пара, выделяемое внутри помещения от парогенератора (генератора холодного тумана), равнялось 200 г/час, влаговыделение происходило на протяжении 28 часов. Общее количество воды, испаренное из парогенератора, равнялось 6 кг. Система вентиляции дома была выключена на весь период проведения эксперимента, однако вентиляционное отверстие в наружной стене не было закрыто.

Физическая модель процессов теплопереноса через многослойную конструкцию с вентилируемым фасадом следующая. Из-за разницы температур воздуха и относительных влажностей в помещении и окружающей среде возникают потоки пара и влаги, которые движутся сквозь ограждающую конструкцию в направлении помещения. Навстречу им движется поток влаги из помещения. Влага, выделяющаяся в помещении парогенератором, конденсируется на внутренней поверхности гипсовой перегородки и проникает вглубь ее. Паробарьер, установленный за слоем гипса, должен обеспечить непроницаемость для пара и влаги, чтобы целлюлозная вата (материал утеплитель этой конструкции) не увлажнилась. Т.к. увлажнение слоя утеплителя увеличит теплопроводность целлюлозной ваты и всей конструкции в целом и может привести к образованию зоны, где будет накапливаться конденсат. В условиях отрицательных температур окружающей среды накопленная влага может превратиться в лед. При повышении температуры образовавшийся лед может

таять, и такой процесс может периодически происходить и разрушать материал утеплителя. Со стороны окружающей среды проникновению внутрь конструкции влаги, но не пара мешает дождевой экран, установленный перед слоем ДСП. Пар может проникать в слой утеплителя. Природный вентилируемый фасад и облицовка из лиственницы снижает воздействие солнечной радиации и дождя на многослойную конструкцию. В воздушной прослойке фасада движется поток воздуха вертикально вверх и обеспечивает конвективный перенос тепла между поверхностями облицовки и ДСП. Из-за разницы температур на поверхностях облицовки и ДСП возникает радиационный теплообмен, который может быть днем направлен в сторону помещения, а ночью – в обратную сторону.

Компьютерная двухмерная модель ограждения помещения (1)-(5) создавалась в программе ANSYS-FLUENT. В модели рассматриваются следующие физические процессы:

1. сопряженный конвективный теплообмен в воздушной прослойке ограждения;
2. радиационный теплообмен в воздушной прослойке ограждения (между поверхностями облицовки и ДСП);
3. сопряженный теплообмен в воздушной прослойке ограждения;
4. теплоперенос внутри ограждающих конструкций;
5. паро- и влагоперенос внутри ограждающих конструкций;
6. влияние падающей солнечной радиации на наружную поверхность ограждения (через коэффициент $\alpha_{\text{рад}}$);
7. движение воздуха в воздушной прослойке ограждения.

Принципы реализации физической модели в программе ANSYS-FLUENT:

- 1). ограждающие конструкции являются пористым материалом;
- 2). на границе материала и воздуха создана непроницаемая для воздуха и влаги стенка, необходимая для учета сопряженного конвективно-

го и радиационного теплообмена в помещении. Поскольку через непроницаемые стенки потока массы нет, моделирование переноса массы паровоздушной смеси через непроницаемую стенку реализовано в виде специальных функций ANSYS-FLUENT, задаваемых на границах сопряжения. Функции обеспечивают равенство потоков в паровоздушной среде и материале ограждающей конструкции, а также отвечают за перенос массы через непроницаемую границу. Граничные условия со стороны воздушной прослойки записываются в виде равенства потоков со стороны стены и воздушной прослойки. Создание подобной функции не было найдено нигде в литературе, и это можно рассматривать как практическую новизну данной работы, поскольку, расширены границы использования пакета ANSYS-FLUENT для недоступного ранее класса задач – сопряженного тепло-массопереноса между твердой поверхностью и паровоздушной средой с учетом радиационного и конвективного теплообмена.

Были приняты следующие допущения модели:

- 1) ограждающая конструкция принимается кусочно-однородной средой;
- 2) линейный характер изменения свойств (коэффициентов влагопроницаемости и паропроницаемости) от влажности.

Высота модели равняется 1 м. Теплопроводность материалов многослойной ограждающей конструкции принята изменяющейся от их влажности. Из-за отсутствия детальной информации о процессах тепловлагообмена в

помещении, заданы граничные условия первого рода по теплу со стороны помещения – температура поверхности стены равна температуре в датчике 1 (рис. 1). Со стороны окружающей среды приняты граничные условия третьего рода – коэффициент конвективной теплоотдачи равный $20 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{С}$, а температура окружающей среды изменяется согласно измерениям, приведенным в [6-8]. Температура воздуха в воздушной прослойке также изменяется согласно данным [6-8], поскольку облицовка имеет зазоры для доступа воздуха из окружающей среды.

Аналогично, в качестве граничных условий по влаге со стороны помещения задана абсолютная влажность в датчике 1. Снаружи помещения заданы граничные условия третьего рода: коэффициент влагоотдачи $\beta = 1 \cdot 10^{-8} \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{Па)}$ [10], а абсолютная влажность изменяется согласно измерениям в [6]. В качестве начальных условий принято тепловое состояние ограждающей конструкции в течении 2-х суток (это позволяет получить более достоверное начальное тепловое и влажностное распределение в ограждении).

Значения коэффициентов k для каждого из слоев ограждающей конструкции идентифицировались по результатам имеющейся экспериментальной информации. Значения коэффициентов k из (1) приведены в табл. 1. Идентификация вызвана недостатком исходных данных, изменением свойств материалов в процессе эксплуатации дома, влиянием многих факторов (например, «sun driven vapor transfer» – потоком пара, вызванным воздействием солнечной радиации) измерить которые невозможно.

Табл. 1. Идентифицированные значения коэффициента k модели

	Название материала	Значение k
1	Гипсовая перегородка	$1 \cdot 10^{-18}$
2	Целлюлозная вата	$1 \cdot 10^{-16}$
3	ДСП	$1 \cdot 10^{-14}$
4	Облицовка из лиственницы	$1 \cdot 10^{-18}$

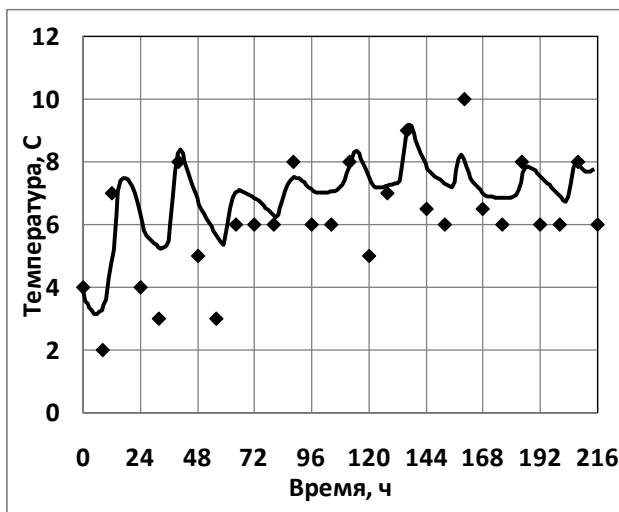
На рис. 2 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений температур и абсолютных влажностей для датчиков 3 и 4 (см. рис. 1, б). Из рис. 2, а и 2, б видно,

что наблюдается большее согласование по температурам, чем по влажности. Меньшую амплитуду колебаний расчетных температур можно объяснить тем, что в модели наружная обшивка

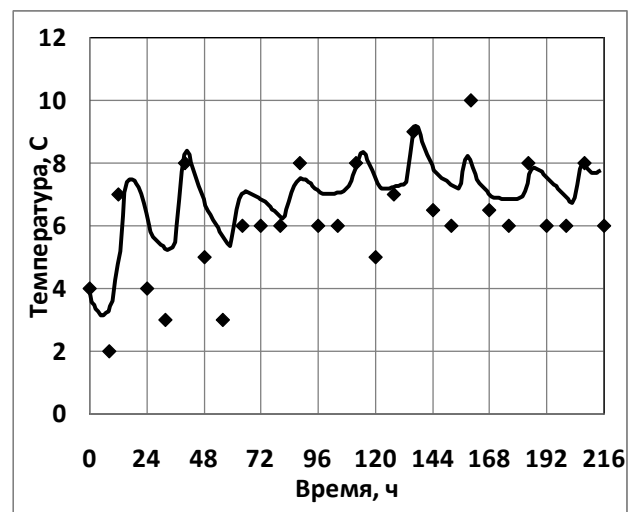
из лиственницы представляет собой сплошной слой материала, в то время как в эксперименте обшивка имеет зазоры между дощечками. Эти зазоры приводят к тому, что ночью температура снижается в эксперименте больше, чем в модели, а днем эти зазоры позволяют проникать большому количеству тепла из-за солнечной радиации в воздушную прослойку. Результаты абсолютной влажности, приведенные на рис. 2, в и 2, г имеют большее различие. Возможной причиной большего различия результатов в датчике 4 по сравнению с датчиком 3, являются погрешности экспериментальных показаний из-за возмож-

ного замерзания влаги в слое ДСП ночью, когда температура в слое падает ниже нуля, поскольку замерзание влаги в модели не учитывается. Большую амплитуду колебаний экспериментальных значений абсолютной влажности в датчиках можно также объяснить наличием зазором в слое обшивки. Эти зазоры интенсифицируют влагообмен на поверхности ДСП.

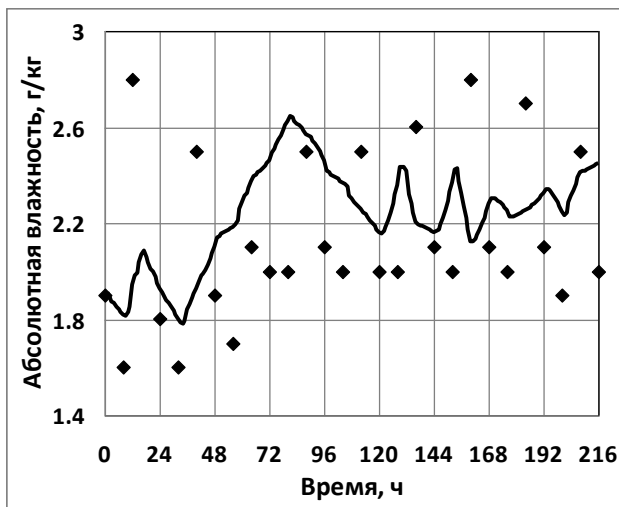
Среднее отклонение между расчетными и экспериментальными значениями температур равно 1,1 °С, однако в некоторые моменты отклонение достигало 2,66 °С. Среднее отклонение между расчетными и экспериментальными



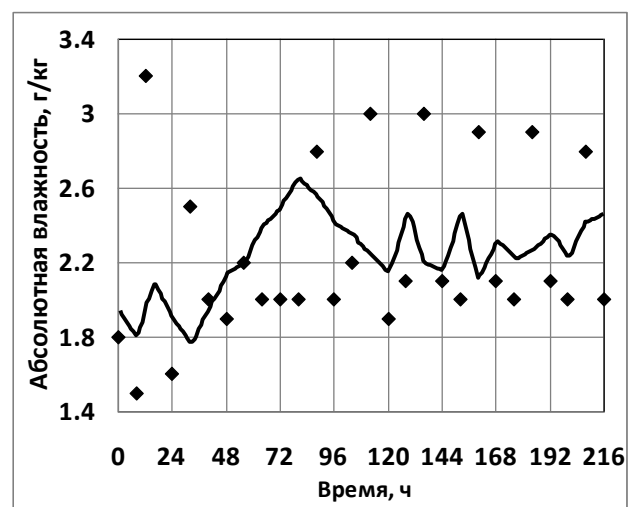
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Сравнение результатов расчетных (сплошные линии) и экспериментальных (точки [6]) исследований. а, б – графики изменения температур в датчиках 3 (а) и 4 (б) по времени, в, г – графики изменения абсолютных влажностей в датчиках 3 (в) и 4 (г) по времени.

значениями абсолютных влажностей равно 0,4 г/кг, однако в некоторые моменты отклонение достигало 1,2 г/кг.

Из результатов расчетов и экспериментов можно заметить что, несмотря на такое большое количество испаренной воды в помещении, в слое целлюлозной ваты, ограниченной с одной стороны паробарьером, а с другой стороны дождевым экраном, не наблюдается рост количества влаги в ходе эксперимента. Особенно это важно для строительства домов из дерева, особо подверженных сильному увлажнению.

Авторы проведенного эксперимента в [6,7] приводят сравнение полученных экспериментальных данных с их расчетами, проведенными в программе HAM-Tools. Ими была создана модель в сосредоточенными параметрами, где помещение было представлено 1 узлом, а стена – 17 по толщине. Задавались постоянные значения коэффициентов конвективного и радиационного теплообмена в помещении, коэффициенты массоотдачи внутри и снаружи помещения. Остается неизвестным вопрос, как авторы моделировали воздушную прослойку, поскольку они упоминают о том, что ее моделирование позволило учесть двухмерные эффекты в тепломассопереносе. Авторы отмечают хорошее согласование результатов экспериментов и расчетов. Однако они же говорят о том, что несмотря на то, что средняя разница между экспериментальными и расчетными температурами равна 0,8 °С, в некоторые моменты времени она достигала 3 °С. Абсолютная влажность совпадала хуже. В качестве причин несовпадения авторы приводят возможные погрешности определения температуры окружающей среды (из-за интенсивной солнечной радиации); высокой скорости воздуха окружающей среды, что приводит к большей инфильтрации конструкции; а также такому явлению как «sun driven vapor transfer» – потоку пара, вызванному воздействием солнечной радиации.

Преимуществом разработанной модели является совместный учет всех механизмов тепловлагообмена в ограждающей конструкции, особенно в воздушном зазоре вентилируемого фасада.

Дальнейшие исследования будут направлены на учет многомерных эффектов тепловлагопере-

носа, расчетов полностью сопряженного тепловлажностного режима помещения и его ограждающих конструкций. Будущая модель должна описывать увлажнение/осушение ограждающей конструкции в зависимости от влажности и температуры воздуха внутри помещения и окружающей среды в годовом цикле, а также рассчитывать образование конденсата в паровоздушной смеси при достижении температуры «точки росы».

Выводы

1. Создана модель сопряженного тепловлагопереноса между многослойными пористыми строительными материалами и паровоздушной средой через наружную ограждающую конструкцию с воздушной прослойкой. CFD-модель учитывает процессы диффузии паров и влаги в материалах слоев ограждающей конструкции.

2. Разработаны специальные функции, реализующие сопряженный тепловлагоперенос в ANSYS-FLUENT. С помощью этих функций расширены границы использования программы ANSYS-FLUENT для решения задач сопряженного тепловлагопереноса между твердой поверхностью и паровоздушной средой с учетом радиационного и конвективного теплообмена.

3. Приведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными натурального эксперимента в г. Гренобль. Анализ показал их хорошее согласование.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ANSYS FLUENT*. Theory Guide. Realise 14.0. - 2011. – 862 с.
2. *Steeman HJ, Janssens A, De Paepe M*. CFD modelling of HAM transport in buildings: The importance of local indoor climate // Annex 41 meeting, UG Oct 2005 Paper A41-T1-B-05-8.- 2006.
3. *Mortensen L. H., Woloszyn M., Rode C., Peuhkuri R*. Investigation of Microclimate by CFD Modeling of Moisture Interactions between Air and Constructions // *Journal of Building Physics*. – 2007. – Vol. 30. – С. 279 – 315.
4. *Belleghem, M.V., Steeman, M., Willockx, A., Janssens, A., De Paepe, M*. Benchmark experiments for moisture transfer modelling in air and porous materials // *Building and Environment*. – 2011. –

Vol. 46. – С. 884 – 898.

5. Круковский П.Г., Полубинский А.С., Тадля О.Ю. Особенности моделирования со-пряженного теплового переноса через газобетонную ограждающую конструкцию // Промышленная тепло-техника. – 2015. – Т. 37, №1. – С. 32 – 44.

6. Labat M. Chaleur – Humidité – Air dans les maisons à ossature bois. Expérimentation et modélisation // Ph.D. Thesis, L'institut National Des Sciences Appliquées De Lyon, France. - 2012. – 180 с.

7. Labat M., Woloszyn M., Garnier G., Piot A., Roux J.-J. Simulation of coupled heat, air and moisture transfers in an experimental house exposed to natural climate // Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28. - 2013. – С. 2898 – 2906.

8. Spitz C., Woloszyn M., Buhé C., Labat M. Simulating combined heat and moisture transfer with Energyplus: an uncertainty study and comparison with experimental data // Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28. – 2013. – С. 668 – 676.

9. Piot A. Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique // Ph.D. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France. – 2009. – 174 с.

10. Künzle H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transfer in Building Components: One- and Two dimensional calculation using simple parameters // Ph.D. Thesis, University of Stuttgart, Germany. – 1995. – 65 с.

**CFD-MODELING OF CONJUGATE
COUPLED HEAT AND MOISTURE
BETWEEN THE POROUS BUILDING
MATERIALS AND STEAM-AIR
ENVIRONMENT**

Krukovsky P. G., Polubinskiy A.S., Tadhia O.Y., Kovalenko V.N.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv-57, 03057, Ukraine

A CFD-model to simulate the conjugate heat and moisture transfer between the building envelope surface and internal air-steam-medium layer with radiation and convective heat transfer. was developed with ANSYS-FLUENT software. The conjugate heat and moisture transfer is realized using of specially created function, that expanded calculated capabilities of ANSYS-FLUENT software. Obtained temperature and absolute humidity distributions with sufficient accuracy correspond to the experimental data.

References 10, fig. 2, tabl. 1.

Key words: coupled heat and moisture transfer, air gap, CFD-simulation, ANSYS FLUENT.

1. *ANSYS FLUENT*. Theory Guide. Realise 14.0. - 2011. – 862 с.

2. *Steehan HJ, Janssens A, De Paepe M*. CFD modelling of HAM transport in buildings: The importance of local indoor climate // Annex 41 meeting, UG Oct 2005 Paper A41-T1-B-05-8.– 2006.

3. *Mortensen L. H., Woloszyn M., Rode C., Peuhkuri R*. Investigation of Microclimate by CFD Modeling of Moisture Interactions between Air and Constructions // *Journal of Building Physics*. – 2007. – Vol. 30. – P. 279 –315.

4. *Belleghem, M.V., Steeman, M., Willockx, A., Janssens, A., De Paepe, M*. Benchmark experiments for moisture transfer modelling in air and porous materials // *Building and Environment*. –2011. – Vol. 46. – P. 884 – 898.

5. *Krukovsky P. G., Polubinskiy A.S., Tadhia O.Y., Kovalenko V.N*. CFD-simulation of coupled vapor and moisture transfer in porous building materials // *Promyshlennaya teplotekhnika*. – 2015. – T. 37, №1. – P. 32 – 44.

6. *Labat M*. Chaleur – Humidité – Air dans les maisons à ossature bois. Expérimentation et modélisation // Ph.D. Thesis, L'institut National Des Sciences Appliquées De Lyon, France. – 2012. – 180 p.

7. *Labat M., Woloszyn M., Garnier G., Piot A., Roux J.-J*. Simulation of coupled heat, air and moisture transfers in an Experimental house exposed to natural climate // *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28*. – 2013. – P. 2898 – 2906.

8. *Spitz C., Woloszyn M., Buhé C., Labat M*. Simulating combined heat and moisture transfer with energyplus: an uncertainty study and comparison with experimental data // *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28*. - 2013. – P. 668 – 676.

9. *Piot A*. Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique // Ph.D. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France. - 2009. – 174 p.

10. *Künzel H.M*. Simultaneous Heat and Moisture Transfer in Building Components: One- and Two dimensional calculation using simple parameters // Ph.D. Thesis, University of Stuttgart, Germany. – 1995. – 65 p.

Получено 20.04.2015

Received 20.04.2015