

Кроме этого, в [12] установлено, что пульсационная составляющая поперечной скорости пропорциональна разности скоростей на границах слоя струи

$$(u_1 - u_2) \approx V^1 \approx \frac{db}{d\tau}. \quad (13)$$

Поэтому, увеличение нестационарности с помощью прерывания потока по нашему мнению, увеличивает динамическое действие струи, то есть проникновение её через топочное пространство до конвективных поверхностей нагрева, расположенных на выходе из топки.

Интенсификация тепломассообмена посредством пульсационного воздействия на стационарный поток уходящих газов является привлекательной для улучшения работы котлоагрегатов, как в плане повышения экономичности, так и в плане повышения надёжности работы, а также в малозатратности этих мероприятий (при наличии уже имеющейся схемы рециркуляции дымовых газов).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Роддатис К.Ф. Справочник по котельным установкам. Москва. Энергоатомиздат, 1989. С.273-274.
2. Лисейкин И.Д. Новая конвективная поверхность нагрева водогрейных котлов. Энергетик. 2001. №1. С.8-10.
3. Северянин В.С., Никитин В.Л. Способ работы котлов. Заявка на патент РБ. №a20010642 от 24.07.01 г.

УДК 697.1

Лапко А., Никитин В.И., Ракецкий В.М.

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ СЛОИСТОГО ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЙ

ВВЕДЕНИЕ

С целью снижения потерь тепла через поверхности ограждений зданий и сооружений в настоящее время широко используются высокоэффективные теплоизоляционные материалы. При этом не всегда удается получить ожидаемый уровень теплоизоляционных эффектов. Такой результат очень часто можно объяснить тем, что при выработке решений проектировщики не в состоянии достаточно полно учесть все особенности сложного нестационарного процесса переноса тепла и влаги в ограждении, выполненном обычно из капиллярно-пористых материалов. Предполагается, что решение этой не простой проблемы можно найти, если в качестве средства для получения данных о тепло-влажностном состоянии проектируемого объекта в определенные моменты его жизненного цикла использовать соответствующие диалоговые системы имитации, включающие адекватные математические модели изучаемых явлений.

В данной статье в качестве примера рассматриваются результаты вычислительного эксперимента, выполненного на разработанной нами диалоговой системе имитации [1]. При расчете нестандартного переноса тепла и влаги использовался метод элементарных балансов. Слагаемые уравнения теплового и материального балансов определялись на основании законов Фурье и Ньютона с учетом граничных условий, характеризующих особенности переноса тепла и влаги. Целью этого эксперимента являлось построение взаимосвязанных

4. Ахмедов Р.Б. Основы регулирования топочных процессов. Москва. Энергия, 1977. С.244-245.
5. Галицкий Б.М. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. Москва. Машиностроение, 1977.
6. Тепло- и массообмен в звуковом поле / В.Е. Накорняков. Новосибирск. Изд-во Института Теплофизики СО АН СССР, 1970.
7. Лебедев В.И. К вопросу об исследовании влияния акустических волн на теплообмен / Физика горения и методы её исследования. Чебоксары. Изд-во ЧувГУ, 1978.
8. Фёдоров Б.Н. Экспериментальное исследование влияния акустических колебаний газового потока на теплообмен / Инженерно-физический журнал. 1977. Т.32, №1. С.61-67.
9. Северянин В.С. Интенсификация горения в котлах малой мощности. Вестник БГТУ. 2001. №2. С.44-47.
10. Пак Х.И. Теплоотдача в ограниченном объёме жидкости при воздействии колебаний / Тр. Американского общества механиков и инженеров. Теплопередача. Москва. Мир, 1972. Сер. С, №4. С.164-171.
11. Северянин В.С. Котлы с пульсирующим горением. Энергетика. Изв. ВУЗов СНГ. 2001. №1. С.79-85.
12. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. Москва. Наука, 1984. С.331-343.

температурно-влажностных полей в трехслойной ограждающей конструкции отапливаемого здания. На основе анализа этих полей появляется возможность выбора оптимальных инженерных решений и путей дальнейших научно-технических исследований в области теплофизики ограждающих конструкций.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучаемая в вычислительном эксперименте слоистая ограждающая конструкция изображена на рис. 1.

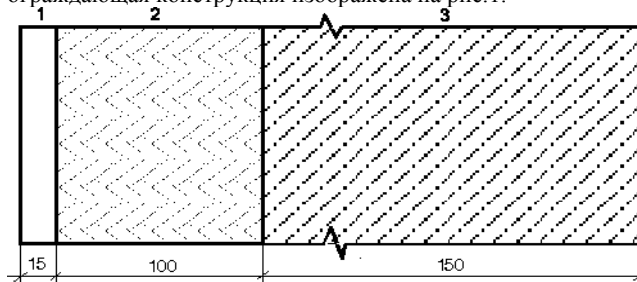


Рисунок 1 – Слоистая ограждающая конструкция, рассматриваемая в вычислительном эксперименте. 1 – внешний отделочный слой; 2 – теплоизоляционный слой; 3 – конструктивный слой.

Лапко Анджей. Профессор, д.т.н., проректор по сотрудничеству и промоции, зав. каф. железобетонных и стеновых конструкций Белостоцкой Политехники, Республика Польша.

Никитин Вадим Иванович. Д.т.н., профессор каф. железобетонных и стеновых конструкций Белостоцкой Политехники, Республика Польша.

Ракецкий Валерий Михайлович. К. ф.-м. н., доцент, зав. каф. информатики и прикладной математики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224107, г. Брест, ул. Московская, 267.

Таблица 1 – Теплофизические показатели материалов ограждения.

Слой ограждения	1- отделочный	2-теплоизоляционный	3-конструктивный
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С)	$\lambda_1=0,93+0,008\omega$	$\lambda=0,04+0,00025\omega$	$\lambda=1,45+0,58\omega$
Удельная теплоемкость C , кДж/(кг·°С)	$C_1=0,83$	$C_2=1,45$	$C_3=0,83+0,042\omega$
Коэффициент паропроницаемости μ , г/(м·ч·Па)	$\mu_1=9,2 \cdot 10^{-5}$	$\mu_2=38,0 \cdot 10^{-5}$	$\mu_3=4,51 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2 – Начальные температурно-влажностные условия.

Слой ограждения	1-отделочный	2-теплоизоляционный	3-конструктивный
Средняя температура слоя	$t_1 = 0^\circ\text{C}$	$t_2 = 10^\circ\text{C}$	$t_3 = 20^\circ\text{C}$
Средняя весовая влажность слоя	$\omega_1 = 1\%$	$\omega_2 = 2\%$	$\omega_3 = 1\%$

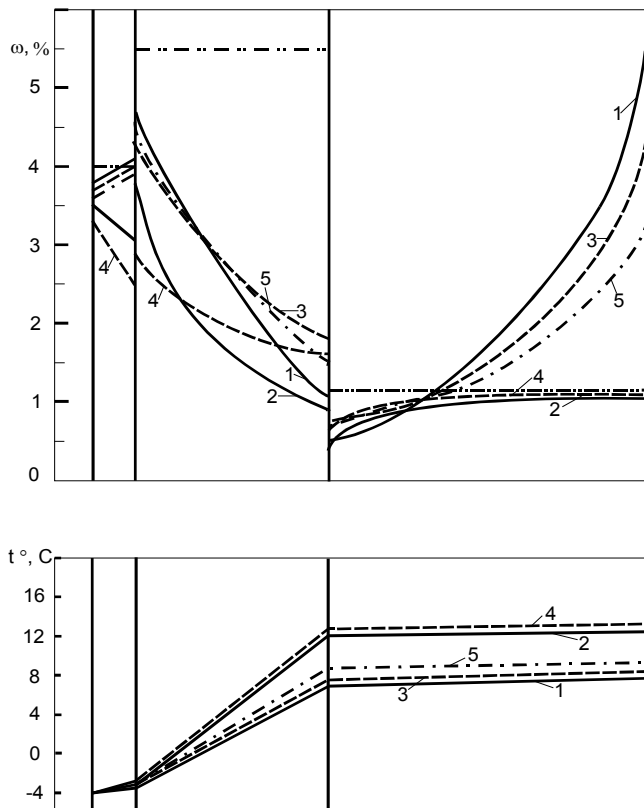


Рисунок 2 – Распределение влаги ω и температуры t по толщине слоистой ограждающей конструкции.

- 1 — ω и t через 30 дней при μ_1, μ_2, μ_3 из табл.1, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ из [3], $\alpha_6=8,7$ Вт/(м²·°С);
- 2 — то же через 7 дней;
- 3 — ω и t через 30 дней при $\mu_2=7 \cdot 10^{-5}$ г/(м·ч·Па), $\beta_3^1=2\beta_3$, остальное без изменений;
- 4 — то же через 7 дней;
- 5 — то же через 30 дней при $\alpha_6=11$ Вт/(м²·°С);
- 6 — максимальная сорбционная влажность материалов.

Конструкция состояла из наружного отделочного слоя толщиной 15 мм, наделенного свойствами цементно-песчаного раствора плотностью 1800 кг/м³, затем следовал теплоизоляционный слой толщиной 100 мм из пенополиуретана плотностью 50 кг/м³, последний внутренний конструк-

тивный слой имел толщину 150 мм и был выполнен из обычного бетона плотностью 2300 кг/м³.

Для проведения расчетов требуются данные о параметрах, характеризующих состояние окружающей воздушной среды и теплофизические свойства материалов конструкции. Наиболее неблагоприятное температурно-влажностное состояние ограждающих конструкций зданий возникает в зимние месяцы. В климатических условиях Республики Беларусь средне-месячная температура наружного воздуха зимой может составлять $t_n=-4^\circ\text{C}$, а его относительная влажность - $\phi_n=99\%$. Близкие к таким значения температуры и влажности воздуха наблюдались в юго-западном регионе республики в декабре 2001 года, когда влажность воздуха не опускалась ниже 90%, а в отдельные дни достигала 100%. Температура воздуха внутри здания была принята равной $t_e=20^\circ\text{C}$, а влажности - $\phi_e=60\%$. Значения других необходимых для выполнения расчетов параметров принимались по данным литературы [2, 3].

Важными параметрами, характеризующими взаимодействие между воздухом и поверхностью ограждения, являются коэффициент теплоотдачи α и сопротивление паропроницанию R_n . Значения этих параметров в рассматриваемом примере приняты в соответствии с рекомендациями строительных норм следующими:

- на внешней поверхности ограждения - $\alpha_n = 23$ Вт/(м²·°С);
- на внутренней поверхности ограждения - $\alpha_e = 8,7$ Вт/(м²·°С);
- на внешней поверхности - $R_{nn} = 13,3$ м²·ч·Па/Г;
- на внутренней поверхности - $R_{ne} = 26,6$ м²·ч·Па/Г.

Численное описание явления переноса тепла и парообразной влаги в материалах ограждения невозможно, если для каждого материала не заданы следующие параметры: коэффициент теплопроводности λ и паропроницаемости μ , а также удельная теплоемкость C . Эти данные приведены в табл.1. Принято, что коэффициент теплопроводности материалов ограждения связан с влагосодержанием материала линейной зависимостью

$$\lambda(\omega) = \lambda_0 + b\omega,$$

где λ_0 – теплопроводность сухого материала;

b – коэффициент;

ω – весовое влагосодержание материала.

При расчете перемещения парообразной влаги требуются изотермы сорбции водяного пара рассматриваемыми материалами. Для характеристики материала в отношении перемещения в нем влаги в жидкой фазе используются данные о

коэффициенте влагопроводности $\beta(\omega)$, г/(мч%). Эти параметры принимались по данным работ [2, 3].

Температурно-влажностные условия в слоях ограждения, принятые для начального момента времени ($\tau=0$), представлены в табл.2.

Распределение влаги и температуры по толще слоистой конструкции через 7 и 30 дней, полученное с помощью вычислительного эксперимента, показано на рис. 2.

Кривые 1 и 2 построены при отмеченных выше условиях. При построении кривых 3 и 4 уменьшено значение коэффициента паропроницаемости теплоизоляционного слоя μ с $38,0 \cdot 10^{-5}$ г/(мчПа) до $7,0 \cdot 10^{-5}$ г/(мчПа) и одновременно значение коэффициента влагопроводности бетона $\beta(\omega)$, взятые из [3], были увеличены в два раза. Затем эти изменения были дополнены новыми более высоким значением коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности ограждения $\alpha_6 = 11$ Вт/(м²·°С) и построены кривые 5 (см. рис. 2)

АНАЛИЗ ДАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Как следует из рис. 2 при коэффициенте теплоотдачи на внутренней поверхности ограждения $\alpha_6 = 8,7$ Вт/(м²·°С) через 7 дней влагосодержание материалов не вышло за рамки максимального возможной сорбционной влажности (см. кривые 2 на рис. 2). Это означает, что материалы оставались в воздушно-сухом состоянии, а влага в порах материалов перемещалась в виде пара и поверхностных пленок. Однако температура внутренней поверхности ограждения снизилась с 20°С до 13,5°С и разница между температурой воздуха и температурой поверхностью составила 6,5°С, что на 0,5°С ниже допустимой для жилых зданий. Отметим, что разница в 6°С была достигнута через 6 дней.

После 7 дней во внутреннем конструктивном слое ограждения началось образование конденсационной влаги и стало возможным ее перемещение не только в виде пара, но и в жидкой фазе. После 30 дней заметное переувлажнение внутреннего слоя конструкции привело к резкому снижению его температуры (см. кривые 1 на рис. 2). В результате разница между температурой внутренней поверхности ограждения и температурой воздуха в помещении превысила 10°С. Такая разница является предельной даже для промышленных зданий.

Следует заметить, что в действительности количественная сторона распределения влаги и температуры по толщине слоистой конструкции будет несколько отличаться от той, которая представлена кривыми 1 и 2 на рис.2. Возможные количественные изменения объясняются тем, что нестационарные процессы переноса тепла и влаги нельзя адекватно отслеживать, не меняя во времени и пространстве значений определяющих параметров. К таким параметрам прежде всего относятся коэффициенты теплопроводности λ , паропроницаемости μ и влагопроводности β , которые зависят от состава, поровой структуры и тепловлажностного состояния материалов.

Правильный выбор этих параметров наиболее важен для высокоэффективных теплоизоляционных материалов, которые играют важную роль в передаче тепла и влаги в слоистой конструкции (рис.2). К сожалению, необходимые данные для многих новых материалов просто отсутствуют, а приводимые в литературе значения свойств имеют значительный разброс. Так, для пенополиуретана крайние значения коэффициента паропроницаемости μ могут отличаться почти в шесть раз. Кроме того, он существенно уменьшается при уменьшении

влажности материала. Сильное влияние влажности на теплопроводность пенопластов показано в работе [4]. Коэффициент влагопроводности $\beta(\omega)$ также нуждается в уточнении. Из результатов работы [5] следует, что экспериментальные значения $\beta(\omega)$, используемые в расчетах, являются несколько заниженными по сравнению с реальными значениями, определяемыми с учетом гравитационных сил.

Результаты уменьшения значения коэффициента μ для пенопласта и увеличения коэффициента $\beta(\omega)$ для бетона (внутренний слой) иллюстрируются кривыми 3 и 4 на рис.2.

Как видно из рис.2, эти изменения благоприятно отразились на температурно-влажностном состоянии внутреннего (конструктивного) слоя ограждения, но привели к повышению влажности теплоизоляционного слоя и ухудшению его состояния.

Увеличение разницы между температурой воздуха и температурой внутренней поверхности ограждения должно увеличивать значение коэффициента теплоотдачи α_6 и улучшать температурно-влажностное состояние конструкции. Кривые 5 на рис.2, построенные при увеличении α_6 с 8,7 до 11 Вт/(м²·°С), подтверждают это предположение.

Расчеты показали, что увеличение толщины слоя пенополиуретана со 100 мм до 120 мм способствует улучшению состояния конструкции. Влажность поверхности внутреннего слоя к концу месяца снизилась на 0,56%, а температура увеличилась на 0,66°С. Снижение влажности наружного воздуха с 99% до 90% привело к снижению влажности отделочного слоя в среднем на 0,6%, пенополиуретана – на 0,2% и не отразилось на внутреннем слое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вычислительный эксперимент показал, что целесообразно проводить дальнейшие исследования, связанные с построением математических описаний таких теплофизических параметров материалов, как коэффициент теплопроводности λ , паропроницаемости μ и влагопроводности β . Это позволит повысить точность вычислительных экспериментов, выполняемых на диалоговых системах имитации, и обоснованность решений, применяемых при проектировании и реконструкции ограждений зданий и сооружений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Никитин В.И., Ракецкий В.М., Лапко А., Прусил И.А. Имитация тепло- и влагопереноса в теплоизоляционных материалах. Вестник БГТУ – Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – 2001. №2(8). – С.50-53.
2. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.:Стройиздат. – 1973. – 287 с.
3. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий. НИИСФ Госстроя СССР. – М.:Стройиздат, 1984. – 168 с.
4. Никитин В.И., Езерский В.А. Прогнозирование теплопроводности пенопластов// Вестник БПИ – Строительство и архитектура. – 2000. - №1. – С.48-51.
5. Афонин А.В., Никитин В.И. К расчету переноса жидкой влаги в капиллярно-пористых материалах// Материалы VIII международного научн.-практ. семинара «Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений, подготовки инженерных кадров для строительной отрасли» - Минск: Стринко, 2001. – С.29-39.