

УДК 699.86: 729.6

## НОВАЯ ФАСАДНАЯ СИСТЕМА С ВЕНТИЛИРУЕМЫМИ КАНАЛАМИ ДЛЯ УТЕПЛЕНИЯ НОВЫХ И РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ

*Низовцев М.И.<sup>а</sup>, Белый В.Т.<sup>б</sup>, Стерлягов А.Н.<sup>а</sup>*  
*<sup>а</sup>Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск*  
*<sup>б</sup>ООО ТЕРМОЛЭНД, г. Новосибирск*

### Введение

Системы вентилируемых фасадов зданий за последние годы получили широкое распространение в различных климатических зонах благодаря таким качествам, как энергоэффективность, широкий выбор дизайнерских решений, снижение влияния солнечной инсоляции на микроклимат помещений, защита от шума, оперативность при проведении ремонта и реконструкции зданий [1].

На работу вентилируемого фасада оказывают влияния внешние условия (солнечная инсоляция, скорость и направление ветра, температура наружного воздуха), внутренние условия (температура и влажность внутреннего воздуха), а, также, особенности конструкции (геометрия воздушной прослойки, состав материалов фасада и их расположение) [2].

Широкое распространение в практике строительства вентилируемых фасадов и многообразие различных факторов, влияющих на эффективность их работы, способствовало за последние годы проведению расчетных работ в области численного моделирования процессов газодинамики и тепло-массообмена в вентилируемых фасадах [3–7]. Основы анализа свободноконвективных течений у нагретых или охлаждаемых вертикальных поверхностей заложены в классических работах Bar-Cohen and Rohsenow [8], Rohsenow et al. [9] or Sparrow et al [10].

Однако следует отметить, что, несмотря на все возрастающее в последние годы количества расчетных работ, посвященных вентилируемым фасадам, задача разработки апробированных инженерных методик расчетов таких фасадных систем на сегодняшний день остается актуальной. Поэтому, большое значение приобретают экспериментальные исследования вентилируемых фасадов [11–13], которые позволяют верифицировать и оптимизировать расчетные методики.

В недавно опубликованных работах обращено внимание на ряд конструктивных особенностей вентилируемых фасадов. Так, в [14] отмечается, что недостаточное внимание уделяется выбору материалов наружной облицовки вентилируемого фасада, хотя наружная облицовка может играть важную роль в фасадной системе. В [15] описаны результаты исследований влияние теплоотражающей пленки на поверхности вентилируемого воздушного зазора, и показана ее эффективность особенно в ночное время в зимний период. В [16] обращено внимание на проблему необходимости учета массивности ограждающих конструкций при анализе работы вентилируемого фасада.

В литературе проводятся результаты исследований свойств различных “активных” вентилируемых фасадов с принудительной вентиляцией и управляемыми затеняющими элементами [17], с размещенными на наружной поверхности солнечными батареями [18, 19].

В регионах с жарким климатом вентилируемые фасады позволяют снизить влияния нагрева наружных поверхностей стен здания на внутренний микроклимат помещений [20, 21]. В регионах с низкими температурами зимой и продолжительным холодным периодом одна из основных функций вентилируемых фасадов зданий является

поддержание наружного слоя утеплителя в относительно сухом состоянии, так как теплозащитные характеристики минераловатного утеплителя в значительной степени определяются его влажностным состоянием [22].

В вентилируемых фасадах со слоем утеплителя используются различные материалы, но, как правило, такие фасады имеют общее конструктивное решение. При установке на стене здания вентилируемого фасада в первую очередь производится монтаж подсистемы, состоящей из металлических кронштейнов и направляющих, затем на стене здания закрепляется слой теплоизоляционного материала, после этого на некотором расстоянии от утеплителя устанавливается слой наружной облицовки. Таким образом, при установке обычного вентилируемого фасада все операции выполняются на строительной площадке, что усложняет контроль качества монтажных работ, а также увеличивает время их выполнения.

В статье будет описана новая фасадная система на основе теплоизоляционных плит заводского изготовления с вентилируемыми каналами и приведены результаты тепловых и влажностных расчетов при утеплении данной фасадной системой кирпичных стен вновь строящихся и реконструируемых зданий.

### **Фасадная система с вентилируемыми каналами**

При разработке новой фасадной системы ставилась задача создания системы максимальной заводской готовности для утепления стен, как вновь строящихся, так и реконструируемых зданий. Такая фасадная система с вентилируемыми каналами была разработана и получила свое название фасадная система “Термолэнд”. Основу новой фасадной системы (рис. 1) составляют теплоизоляционные панели [23], которые изготавливаются в заводских условиях на конвейерной линии. Снаружи панели расположена облицовка, представляющая собой тонкий слой металла со специальным декоративным покрытием. Облицовка наклеивается на слой минеральной ваты, который с наружной стороны имеет продольные вентилируемые каналы (рис.2), поперечное сечение вентиляционных каналов  $20 \times 40 \text{ мм}^2$ , расстояние между каналами 62 мм, данные размеры были определены из тепло-влажностных расчетов, результаты которых приведены ниже. Общая толщина слоя утеплителя в панели  $d$  может изменяться в зависимости от назначения панели. Общие размеры стандартной панели  $3000 \times 1190 \text{ мм}$ .

Панели крепятся к стене вновь строящегося или реконструируемого здания стальными анкерами (рис. 1). Между панелями при монтаже оставляются горизонтальные промежутки, заполняемые минеральной ватой до дна вентиляционных каналов, таким образом, формируются горизонтальные вентилируемые щели, которые с наружной стороны прикрываются вентиляционными нащельниками.

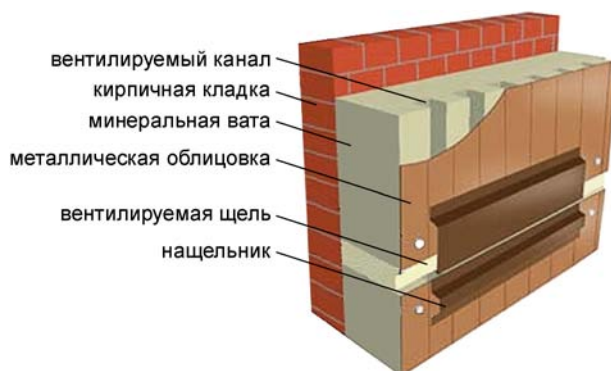


Рис. 1. Фасадная система с вентилируемыми каналами.

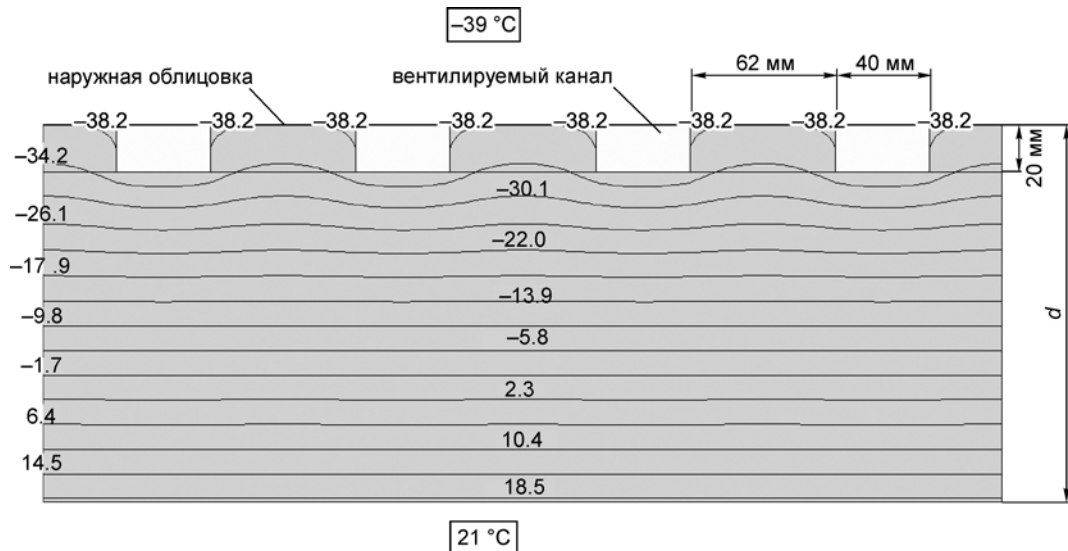


Рис. 2. Результаты теплового расчета теплоизоляционной панели толщиной 160 мм.

### Результаты тепловых расчетов

При реконструкции и новом строительстве зданий, имеющих приведенное сопротивление теплопередаче конструкционного слоя,  $R_0$ , возникает потребность в определении толщины теплоизоляционной панели, обеспечивающей требуемое приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены

$$R_{\text{тр}} = R_0 + R_{\text{п}},$$

где  $R_{\text{п}}$  – термическое сопротивление теплопередаче панели.

С использованием компьютерной программы “Term 5”, позволяющей проводить 2-мерные тепловые расчеты строительных конструкций были выполнены тепловые расчеты панелей различной толщины с вентиляционными каналами [24]. При расчетах коэффициент теплопроводности минеральной ваты в панелях принимался  $0.042 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ , это значение характерно для широкого круга минераловатных утеплителей. Результаты одного из расчетов показаны на рис. 2 и приведены в виде графической зависимости на рис. 3. Из анализа графической зависимости  $R_{\text{п}}(d)$  следует, что она имела линейный характер в диапазоне  $80 \text{ мм} \leq d \leq 250 \text{ мм}$  и ее можно выразить зависимостью:

$$R_{\text{п}} = 0.0238(d - 80) + 1.621$$

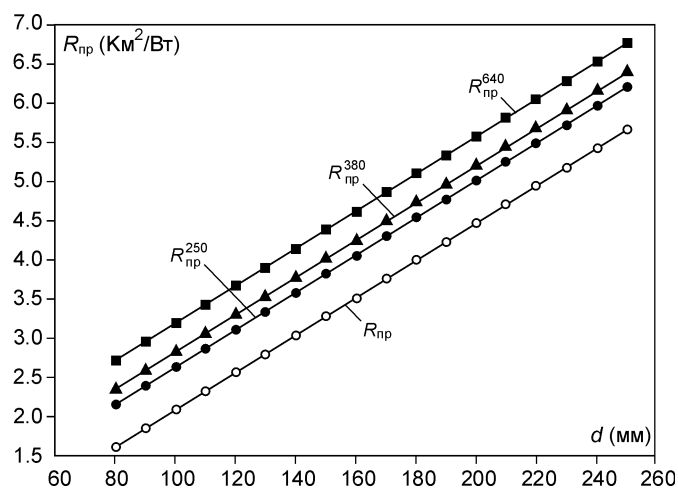


Рис. 3. Зависимость термического сопротивления панели и приведенных сопротивлений теплопередаче утепленных кирпичных стен от толщины панели.

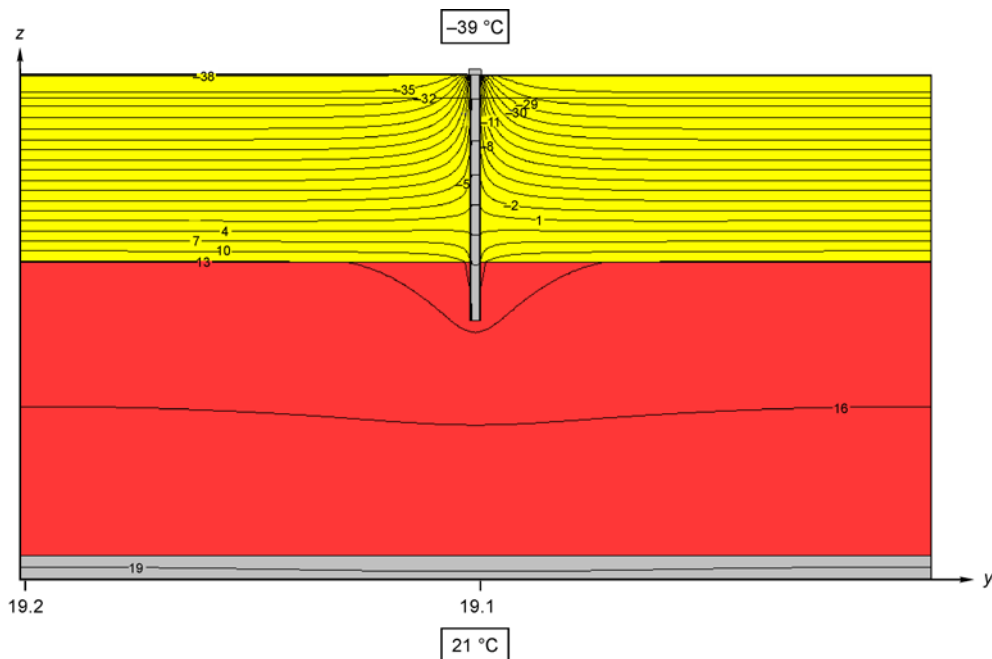


Рис. 4. Результаты расчета распределения температуры в сечении анкера крепления панели для кирпичной кладки 250 мм. при количестве анкеров 15 шт./панель.

Были выполнены тепловые расчеты приведенного сопротивления теплопередаче стен зданий из глиняного кирпича толщиной кладки 250 мм ( $R_{пр}^{250}$ ), 380 мм ( $R_{пр}^{380}$ ), 640 мм ( $R_{пр}^{640}$ ) при утеплении их панелями с вентиляционными каналами разной толщины. Расчеты проведены с использованием компьютерной программы “Term 6” с учетом 20 мм слоя цементно-песчаной штукатурки на внутренней поверхности стены. При расчетах приведенных сопротивлений теплопередаче общий коэффициент теплоотдачи с наружной стороны принимался  $23 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , а с внутренней –  $8.7 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Результаты расчетов приведены на рис. 3 и хорошо обобщаются зависимостями:

$$\begin{aligned} R_{пр}^{250} &= 0.0238(d-80) + 2.165 \\ R_{пр}^{380} &= 0.0238(d-80) + 2.351 \\ R_{пр}^{640} &= 0.0238(d-80) + 2.722 \end{aligned}$$

По результатам тепловых расчетов были определены рекомендуемые толщины теплоизоляционных панелей с вентилируемыми каналами для кирпичных стен разной толщины при условии на 5–10% превышения требуемых приведенных сопротивлений теплопередаче стен жилых зданий для климатических условий г. Новосибирска [25]. Согласно выполненным расчетам, рекомендуемая толщина теплоизоляционных панелей для кирпичной кладки 250 мм составила 160 мм, для кладки 380 мм – 150 мм, для кладки 640 мм – 140 мм.

Крепление теплоизоляционных панелей к кирпичной кладке металлическими анкерами приводит к дополнительным тепловым потерям, относительную величину которых можно характеризовать коэффициентом теплотехнической однородности,  $r = R_{пр+}/R_{пр}$ , где  $R_{пр+}$  – приведенное сопротивление стены здания с учетом элементов крепления, а  $R_{пр}$  – без учета элементов крепления.

С целью определения коэффициентов теплотехнической однородности крепления панелей были выполнены тепловые расчеты при утеплении кирпичных стен вновь строящихся зданий (толщина кирпичной кладки 250 мм, толщина панели 160 мм) и реконструируемых зданий (толщина кирпичной кладки 640 мм, толщина панели 140 мм). При расчетах на внутренней поверхности кирпичных стен учитывался слой цементно-песчаной штукатурки толщиной 20 мм.

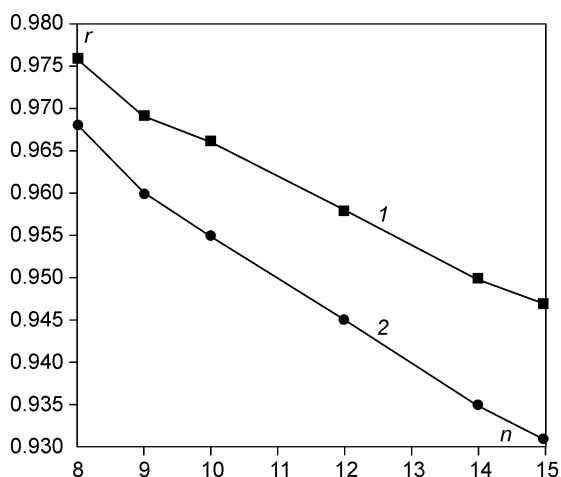


Рис. 5. Коэффициент теплотехнической однородности утепленной кирпичной стены при различном количестве анкеров крепления панели. 1 – кирпичная кладка 640 мм, 2 – 250 мм.

Расчеты проведены с использованием специализированной компьютерной программы “HEAT 3.5”, предназначенной для проведения трехмерных тепловых расчетов элементов строительных конструкций [26]. При расчетах рассматривалась типовая теплоизоляционная панель с вентилируемыми каналами размером 1190x3000 мм, которая крепилась к кирпичной кладке 8, 12 или 15

стальными анкерами  $\varnothing$  8 мм. Размеры расчетного участка определялись поверхностью теплоизоляционной плиты, приходящийся на 1 анкер. Расчеты выполнены при температуре внутреннего воздуха 21 °С и температуре наружного воздуха –39 °С, что соответствует температуре наиболее холодной пятидневки для климатических условий г. Новосибирска [27].

В качестве примера на рис. 4 приведены результаты расчета распределения температуры кирпичной кладки толщиной 250 мм, утепленной теплоизоляционной панелью толщиной 160 мм, в сечении анкера крепления при использовании 15 анкеров на панель. Согласно результатам расчета температура внутренней поверхности стены напротив расположения анкера была достаточно высокая 19.1 °С и лишь на 0.1 °С отличалась от температуры внутренней поверхности стены вдали от анкера.

По результатам расчетов были определены коэффициенты теплотехнической однородности крепления панелей на кирпичной кладке толщиной 250 мм и 640 мм при различном количестве анкеров крепления на одну панель (рис. 5). Выполненные теплотехнические расчеты показали, что коэффициенты теплотехнической однородности крепления панелей с вентилируемыми каналами для вновь строящихся и реконструируемых кирпичных зданий лежат в диапазоне 0.98–0.93, и они существенно выше коэффициентов теплотехнической однородности крепления обычных вентилируемых фасадов [28].

### Результаты расчетов влажностного состояния

С целью определения влажностного состояния стен вновь строящихся и реконструируемых зданий при их утеплении панелями с вентилируемыми каналами были выполнены влажностные расчеты для двух конструктивных вариантов.

**Вариант 1.** Стена вновь построенного здания из глиняного кирпича с толщиной кладки 250 мм утеплена с наружной стороны теплоизоляционными панелями толщиной 160 мм с вентилируемыми каналами.

**Вариант 2.** Стена реконструируемого здания из глиняного кирпича с толщиной кладки 640 мм утеплена с наружной стороны теплоизоляционными панелями толщиной 140 мм с вентилируемыми каналами.

В качестве утеплителя в панелях использована минеральная вата плотностью 105 кг/м<sup>3</sup>. Внутренняя поверхность стен оштукатурена цементно-песчаной штукатуркой толщиной 20 мм.

Оба расчета проведены при одинаковых граничных условиях. Внутри помещений температура воздуха принималась 21 °С и относительная влажность воздуха 55%.

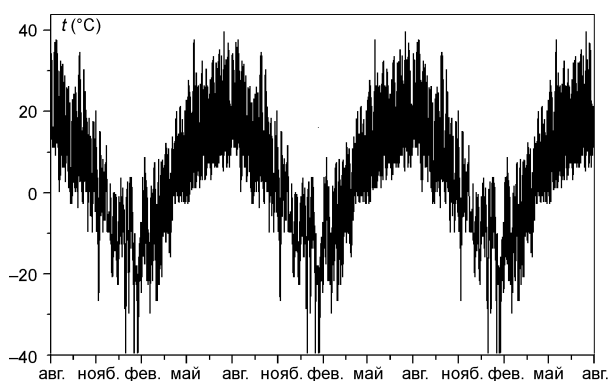


Рис. 6. Изменение температуры на наружной поверхности стены (кирпичная кладка 250 мм).

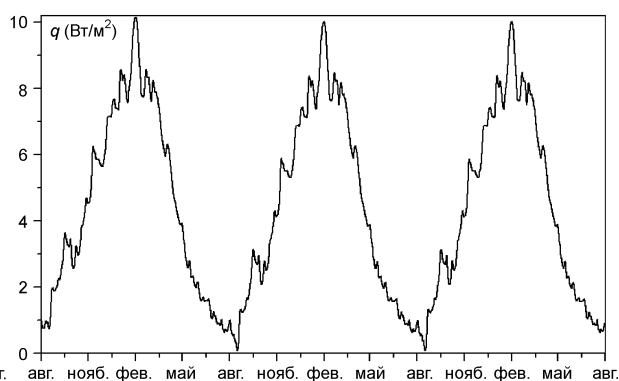


Рис. 7. Изменение плотности теплового потока на внутренней поверхности стены (кирпичная кладка 250 мм).

С наружной стороны температура воздуха, относительная влажность воздуха, плотность потока солнечной радиации задавались с часовым интервалом для условий типичного года, близкого к климатическим условиям для г. Новосибирска.

Расчеты выполнялись для стен зданий ориентированных на запад. Коэффициент поглощения солнечной инсоляции наружной поверхностью стены принят 0.4. Расчеты проводились за период 3 лет, начиная с 1 августа.

Расчеты выполнялись с использованием компьютерной программы “Wufi 2D-3”, предназначенной для выполнения двумерных нестационарных тепло-влажностных расчетов строительных конструкций [29, 30].

### Влажностное состояние стены вновь построенного здания

Начальная влажность кирпичной кладки и штукатурного слоя после завершения строительства здания повышенная и принималась в расчетах равной сорбционной влажности материалов при 80% относительной влажности воздуха.

Согласно результатам расчетов со снижением температуры на наружной поверхности стены в зимние месяцы (рис. 6) возрастала плотность теплового потока через стену и достигала максимальных значений около 10 Вт/м<sup>2</sup> (рис. 7).

На рис. 8 показано изменение средней относительной массовой влажности слоя минеральной ваты панели. Согласно результатам расчета зимой первого года после окончания строительства влажность незначительно превышала 2%, что было связано с повышенной влажностью кирпичной кладки, а далее снижалась и в последующие годы в зимнее время повышалась до 1.5%. Такое повышение влажности минеральной ваты не является существенным и незначительно влияет на теплозащитные свойства утеплителя. Таким образом, как показали расчеты, утеплитель в панели с вентилируемыми каналами находился в относительно сухом состоянии, и опасности роста грибка в нем не было. Об этом свидетельствуют данные рис. 9, на нем точками показаны гидротермальные условия, в которых находился утеплитель в панели в различные моменты времени, здесь же приведена гидротермальная кривая, выше которой в

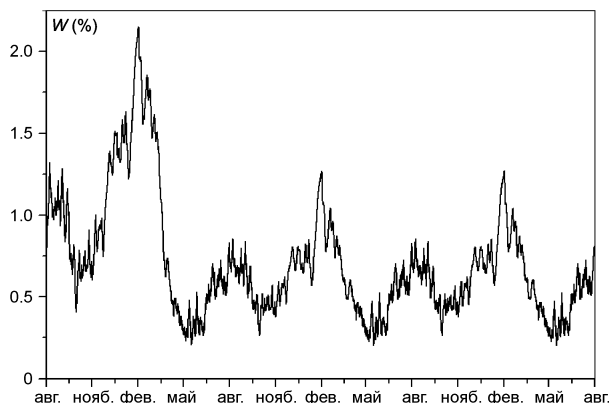


Рис. 8. Средняя относительная массовая влажность минеральной ваты (кирпичная кладка 250 мм).

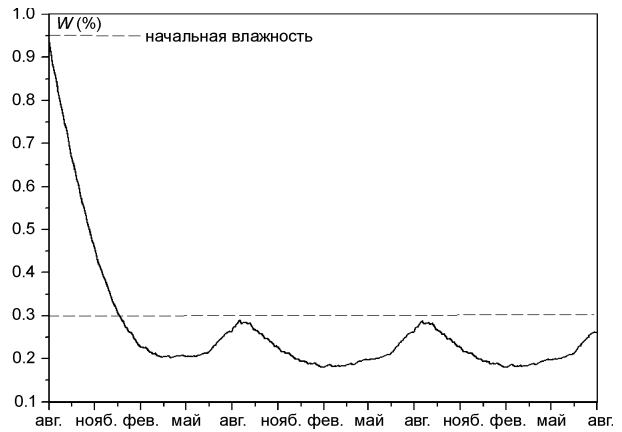
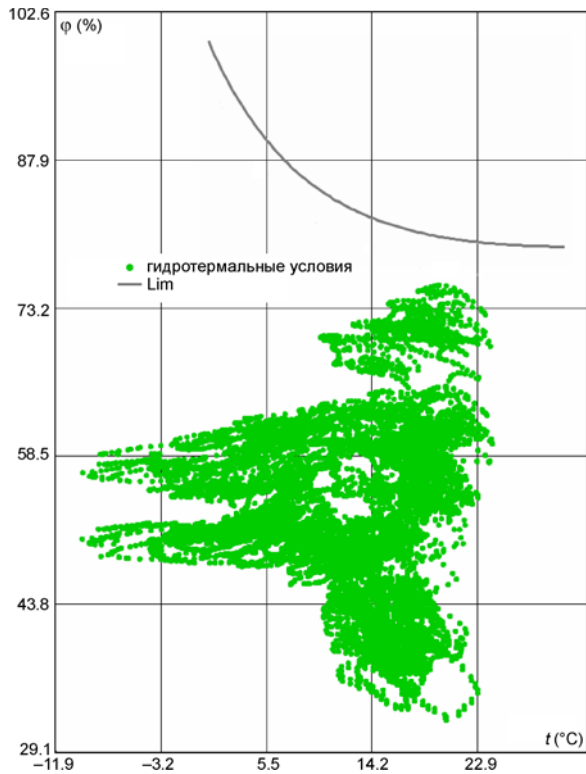


Рис. 10. Средняя относительная массовая влажность кирпичной кладки (кирпичная кладка 250 мм).

Рис. 9. Гидротермальные условия в слое утеплителя (кирпичная кладка 250 мм).

утеплителе возможно образование грибка.

По результатам расчетов относительная влажность кирпичной кладки стены здания резко снижалась в первый год после окончания строительства и далее находилась на уровне 0.2% с незначительным повышением до 0.3% в период конца лета – начала осени (рис. 10). В целом, можно отметить, что уровень влажности кирпичной кладки стены достаточно низкий.

В результате расчетов была определена плотность диффузионного потока влаги и его направление на границе слоев кирпичная кладка – утеплитель панели (рис. 11а). Из анализа представленных на рисунке результатов следует, что зимой поток влаги направлен из кирпичной кладки в утеплитель (положительное значение), а летом, преимущественно, наоборот, из утеплителя в кирпичную кладку (отрицательное значение).

По результатам расчетов для определения будут ли вентилируемые каналы обеспечивать удаление поступающей в утеплитель влаги, была найдена средняя плотность диффузионного потока влаги в зимние месяцы,  $\bar{q}_m = 7.7 \cdot 10^{-8} \text{ кг/м}^2\text{с}$  (рис. 11б). Были проведены расчеты газодинамики вентилируемых каналов в январе месяце при

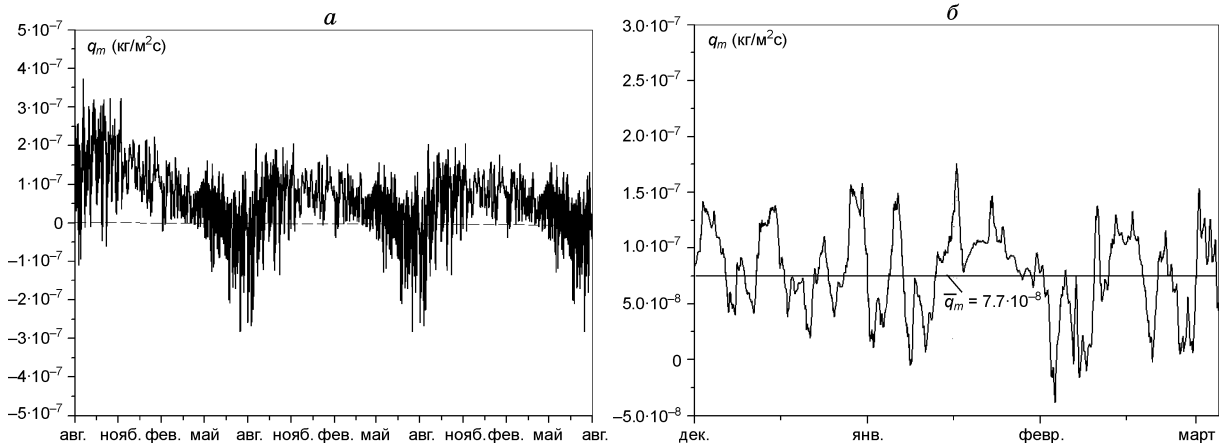


Рис. 11. Плотность диффузионного потока влаги на границе кирпичная кладка–утеплитель а) за трехлетний период, б) в зимнее время (кирпичная кладка 250 мм).

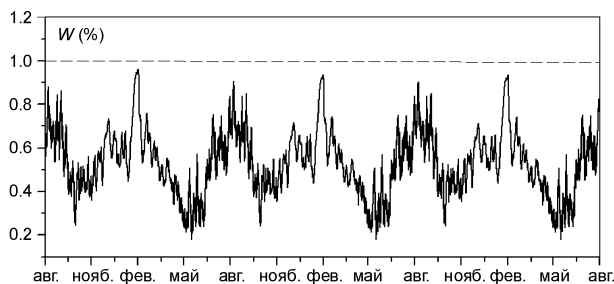


Рис. 12. Средняя относительная массовая влажность минеральной ваты (кирпичная кладка 640 мм).

средней температуре воздуха на улице – 18.8 °С и относительной влажности воздуха 80%, что характерно для климатических условий г. Новосибирска. Скорость воздуха в вентилируемых каналах по результатам расчетов составила 0.2 м/с. Результаты расчетов показали, что при организации межэтажных выходов и входов воздуха в канал каждый вентилируемый канал позволял удалять до  $0.3 \times 10^{-7}$  кг/с влаги при потребности  $0.2 \times 10^{-7}$  кг/с.

Таким образом, расчеты показали, что выбранная геометрия вентилируемых каналов обеспечивает удаление влаги из утеплителя при организации межэтажных входов и выходов воздуха в вентиляционные каналы.

### Влажностное состояние стены реконструируемого здания

Кирпичная стена реконструируемого здания толщиной 640 мм утеплялась панелями толщиной 140 мм с вентилируемыми каналами без мокрых процессов, поэтому начальные влажности кирпичной кладки и штукатурного слоя принимались в расчетах равными сорбционной влажности при 50% влажности воздуха.

Согласно результатам расчета накопления влаги в слое минеральной ваты в панелях в годовом цикле не происходило, наблюдались лишь циклические колебания средней относительной влажности в конце лета и в зимний период, однако относительная влажность при этом не превышала 1% (рис. 12). В течение всего расчетного периода минеральная вата находилась в относительно сухом состоянии, и как показали расчеты гидротермальных условий, в слое утеплителя опасности образования и роста грибка не было.

Результаты расчетов изменения влажности кирпичной кладки в среднем и по слоям приведено на рис. 13. Из результатов расчетов следует, что средняя влажность кирпичной кладки низкая с незначительным повышением в конце лета – начале осени (рис. 13а). При анализе распределения влажности по слоям кирпичной кладки можно отметить, что более высокую влажность имел внутренний слой кирпичной кладки, а наибольшая амплитуда годовых колебаний влажности наблюдалась в наружном слое (рис. 13б).

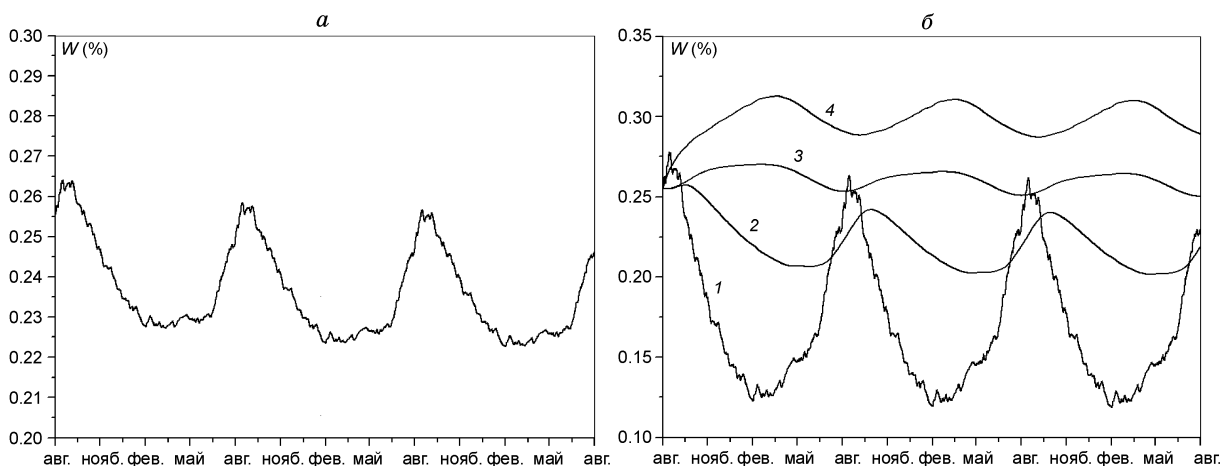


Рис. 13. Средняя относительная массовая влажность кирпичной кладки а) всего слоя, б) по слоям: 1–4 – от наружного к внутреннему слою (кирпичная кладка 640 мм).



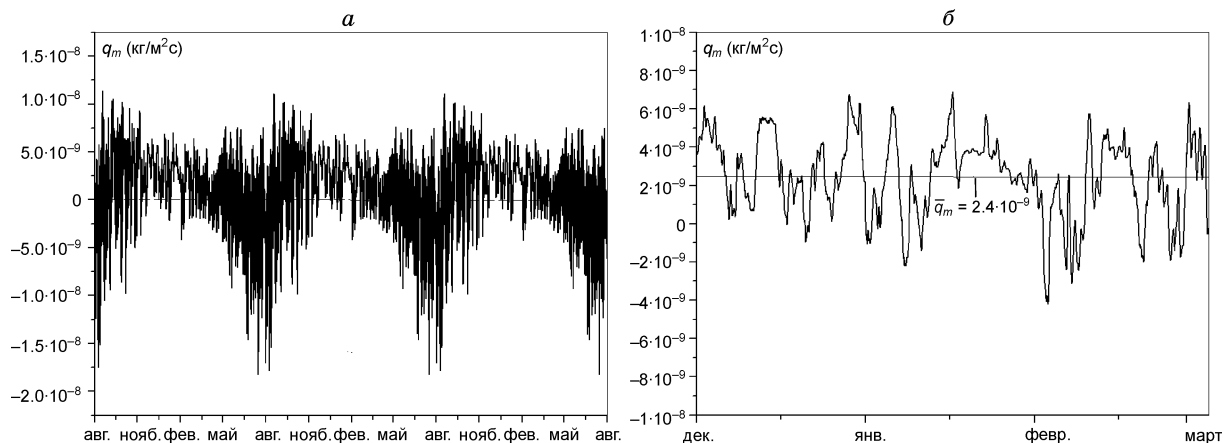


Рис. 14. Плотность диффузионного потока влаги на границе кирпичная кладка – утеплитель а) за трехлетний период, б) в зимнее время (кирпичная кладка 640 мм).

Были выполнены расчеты изменения плотности диффузионного потока влаги на границе кирпичной кладки и слоя утеплителя. Результаты расчетов показали, что, как и в случае расчетов для варианта 1, зимой поток влаги направлен из кирпичной кладки в утеплитель, а летом, преимущественно, наоборот, из утеплителя в кирпичную кладку (рис. 14а). Средний диффузионный поток влаги на границе кирпичная кладка – утеплитель в зимний период согласно расчетам был  $2.4 \cdot 10^{-9}$ , таким образом, его величина была более чем в 3 раза ниже, чем значение потока влаги для вновь построенного здания (вариант расчета 1), и имеющиеся вентилируемые каналы в панелях обеспечили удаление этой влаги.

#### Практическая реализация

Предприятие по выпуску сэндвич-панелей ООО “Термолэнд” в г. Новосибирске освоило и организовало конвейерное производство теплоизоляционных панелей с вентилируемыми каналами для вновь строящихся и реконструируемых зданий. В настоящее время проведена установка фасадных систем утепления на основе панелей с вентилируемыми каналами более чем на 10 различных новых и реконструируемых зданиях в г. Новосибирске и Новосибирской области, некоторые из этих зданий после реконструкции показаны на рис. 15.

Использование широкой гаммы декоративных покрытий позволяет реализовать разнообразные дизайнерские решения при утеплении зданий теплоизоляционными панелями. Опыт установки новой фасадной системы на вновь строящиеся и реконструируемые здания показал высокую скорость и простоту проведения монтажных работ при их хорошем качестве.

Выполненные тепловизионные обследования ряда зданий в зимний период времени подтвердили высокие теплозащитные характеристики новой фасадной системы.



Рис. 15. Жилые дома после утепления теплоизоляционными панелями с вентилируемыми каналами: а) г. Искитим, б) пос. Петровский Новосибирской области.

## Выводы

Предложена и реализована новая фасадная система на основе теплоизоляционных панелей с вентилируемыми каналами заводского изготовления для утепления вновь строящихся и реконструируемых зданий.

Выполнены тепловые расчеты, позволившие определить зависимость термического сопротивления панелей от их толщины. Определены приведенные сопротивления теплопередаче стен кирпичных зданий различной толщины при их утеплении теплоизоляционными панелями с вентиляционными каналами.

На основании теплотехнических расчетов показано, что коэффициенты теплопроводности однородности новой системы утепления фасадов за счет выбранного способа крепления теплоизоляционных плит стальными анкерами для вновь строящихся и реконструируемых кирпичных зданий лежат в диапазоне 0.98–0.93, что существенно выше коэффициентов теплопроводности однородности крепления обычных вентилируемых фасадов.

Выполненные влажностные расчеты показали, что для вновь строящихся и реконструируемых кирпичных зданий могут быть использованы фасадные системы на основе панелей с вентилируемыми каналами предложенной геометрии, при этом кирпичная кладка и слой утеплителя в панелях будут находиться в относительно сухом состоянии, удовлетворяющим нормативным требованиям. Конденсации и накопления влаги в вентилируемых каналах происходить не будет при организации межэтажных воздухоприточных и воздухоотводящих щелей.

## Литература

1. Christian Suarez, Patrice Joubert, Jose L. Molina, Francisco J. Sanchez, *Escuela Superior, Heat transfer and mass flow correlations for ventilated facades, Energy and Buildings* 43 (2011) 3696–3703.
2. F. Patania, A. Gagliano, F. Nocera, A. Ferlito, A. Galesi, *Thermofluid-dynamic analysis of ventilated facades, Energy and Buildings* 42 (2010) 1148–1155.
3. C. Balocco, *A simple model to study ventilated facades energy performance, Energy and Buildings* 34 (2002) 469–475.
4. G. Gan, *Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation, Energy and Buildings* 38 (2006) 410–420.
5. A. Pappas, Z. Zhai, *Numerical investigation on thermal performance and correlation of double skin facade with buoyancy-driven airflow, Energy and Buildings* 40. (2007) 466–475.
6. Christian Suarez, Patrice Joubert, Jose L. Molina, Francisco J. Sanchez, *Heat transfer and mass flow correlations for ventilated facades, Energy and Buildings* 43 (2011) 3696–3703.]
7. Guohui Gan, *Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation, Energy and Buildings* 38 (2006) 410–420.
8. A. Bar-Cohen, W.M. Rohsenow, *Thermally optimum spacing of vertical, natural convection cooled, parallel plates, ASME Journal of Heat Transfer* 106 (1984) 116–123.
9. W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, Y.I. Cho, *Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1998.*
10. E.M. Sparrow, G.M. Chrysler, L.F. Azevedo, *Observed flow reversal and measured-predicted Nusselt numbers for natural convection in a one-sided heated vertical channel, ASME Journal of Heat Transfer* 106 (1984) 325–332.
11. T.F. Ayinde, S.A.M. Said, M.A. Habib, *Experimental investigation of turbulent natural convection flow in a channel, Heat and Mass Transfer* 42 (2006) 169–177.

12. Valentina Serra , Fabio Zanghirella, Marco Perino, Experimental evaluation of a climate facade: Energy efficiency and thermal comfort performance, *Energy and Buildings* 42 (2010) 50–62.
13. C. Marinoscia, P.A. Strachanb, G. Semprinia, G.L. Morinia, Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen facade building.. *Energy and Buildings* 43 (2011) 853–863.
14. P. Seferis a, P. Strachana, A. Dimoudib, A. Androutopoulosc, Investigation of the performance of a ventilated wall, *Energy and Buildings* 43 (2011) 2167–2178
15. M. Ciampi, F. Leccese, G. Tuoni, Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings, *Solar Energy* 75 (2003) 491–502.
16. Ali Fallahi, Fariborz Haghghat, Hafia Elsadi, Energy performance assessment of double-skin facade with thermal mass, *Energy and Buildings* 42 (2010) 1499–1509.
17. R. Fuliotto, F. Cambuli, N. Mandas, N. Bacchin, G. Manara, Q. Chen, Experimental and numerical analysis of heat transfer and airflow on an interactive building facade, *Energy and Buildings* 42 (2010) 23–28.
18. J.A. Clarke, P.A. Strachan, Simulation of conventional and renewable building energy systems, *Renewable Energy* 5 (1994) 1178–1189.
19. L. Mei, D.G. Infield, U. Eicker, V. Fux, Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV facade, *Energy and Buildings* 35 (2003) 605–617.
20. F. Nocera, A. Ferlito, A. Galesi, Thermofluid-dynamic analysis of ventilated facades F. Patania, A. Gagliano, *Energy and Buildings* 42 (2010) 1148–1155.
21. Cristina Sanjuana, Maria Jose Suarez, Marcos Gonzalez, Jorge Pistono, Eduardo Blanco, Energy performance of an open-joint ventilated facade compared with a conventional sealed cavity facade, *Solar Energy* 85 (2011) 1851–1863.
22. Milos Jerman, Robert Cerny, Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials, *Energy and Buildings* 53 (2012) 39–46.
23. Патент (RU) на полезную модель №94597, Стеновая панель для облицовки и утепления строительных сооружений, от 27 мая 2010 г.
24. TERM 5.2/WINDOW 5.2 NFRC Simulation Manual, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006.
25. Строительные нормы и правила 23-02-2003. Тепловая защита зданий, Москва, Госстрой России, 2004.
26. Thomas Blomberg, HEAT 3 a PC- program for heat transfer in tree dimansions. Manual with brief theory and examples, Lund-Gotheenburg Grop for Computational Building Physics, 2001.
27. Строительные нормы и правила 23-01-99\*.Строительная климатология, Москва, Госстрой России, 2000.
28. В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, Е.Ю. Цыкановский, Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором, Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика 3 (2004) 20–26.
29. D. Zirkelbach, Th. Schmidt, H.M. Kunzel, M. Kehler, Ch. Bludau, WIFI 2D Installation and Instrodution, Fraunhofer Institute of Building Physics.
30. H.M. Kunzel, Simultaneous heat and moisture transport in building components, PhD Thesis, Fraunhofer Institute of Building Physics, Germany, 1995.