

УДК 692.23

В.С. БЕЛЯЕВ, канд. техн. наук, ОАО «Центральный научно-исследовательский и проектный институт жилых и общественных зданий» (Москва)

Наружные ограждающие конструкции с рекуперацией трансмиссионного тепла

Выполнен анализ конструктивных и эксплуатационных параметров наружных ограждений с рекуперацией тепла, выявлен тепловой эффект и его зависимость от расхода воздуха, а также теоретические положения и особенности теплотехнического расчета элементов рассматриваемой системы.

Ключевые слова: рекуперация тепла, тепловой эффект, коэффициент излучения, сопротивление теплопередаче, расход воздуха, тепловой поток, трансмиссионные теплопотери.

Здание как энергетическая система формирует тепловой и воздушный режим (ТВР) помещений. При этом системы отопления и вентиляции наряду с наружными ограждениями играют решающую роль. Оптимизация ТВР должна иметь целью как экономию топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и обеспечение требуемых параметров систем вентиляции, так и уменьшение влияния на загрязнение атмосферы.

Учитывая, что экономически нецелесообразно утеплять стены больше определенной величины, следует искать пути получения энергоэкономичных конструкций нетрадиционными способами, например используя их как накопители тепла (массивные), гелиовоздухонагреватели, утилизаторы уходящего тепла и т. п.

При установке герметичных окон со стеклопакетами баланс между притоком и вытяжкой воздуха нарушается, вся эта система естественной вентиляции практически перестает работать. Результат известен: духота, дискомфорт, повышенная влажность, зимой конденсат на окнах и стенах вплоть до появления грибков и плесени.

Улучшению воздушного режима помещений и экономии тепла отвечает способ вентиляции помещений через наружные ограждения с выводом воздуха в помещение. Эффект такой вентиляции заключается в том, что холодный воздух, проходя через наружное ограждение, нагревается и входит в помещение, возвращая часть теряемого тепла.

Основы экспериментальных и теоретических исследований наружных ограждающих конструкций, утилизирующих уходящее трансмиссионное тепло, начаты впервые в лаборатории теплового и воздушного режима зданий ЦНИИЭП жилища. Получен обширный материал, подтверждающий эффективность таких конструкций.

Наружные ограждения стены с вентилирующими устройствами, утилизирующие тепло, могут быть с одинарным, двойным и многократным движением воздуха (НОРТ).

Принципом действия стен (НОРТ-1) является рекуперация (возвращение) трансмиссионного (о наружных ограждениях, утилизирующих кроме трансмиссионного и вентиляционное тепло, – НОРТ-2 и НОРТ-п будет сказано в следующей статье на эту тему) теплового потока движущимся воздухом в помещение (рис. 1). Наружный воздух поступает в вентилируемую прослойку через приточные отвер-

стия внизу наружного защитного слоя, поднимается вверх по прослойке и входит в помещение через приточные отверстия сверху внутреннего слоя.

Конфигурация сечения приточных каналов служит для поступления свежего воздуха в помещение в зимнее время. Площадь сечения канала должна быть больше площади сечения воздухозаборной щели. Сечения рассчитываются в зависимости от расчетного напора воздуха.

С внутренней стороны приточных каналов крепят регулируемые клапаны, которые могут перекрывать их полностью или частично, в зависимости от тепловлажностного режима и требуемого воздухообмена помещения. Регулировка клапанов осуществляется индивидуально по ощущению комфорта.

НОРТ-1 применяются во всех районах, где допускается естественная вентиляция, в зданиях, если в них имеется естественная или механическая вентиляция.

НОРТ-1 могут иметь как сплошную вентилируемую воздушную прослойку, так и выполненную из воздухопроницаемого материала, имеющего коэффициент воздухопроницаемости порядка $12 \text{ кг/(ч}\cdot\text{Па}^{2/3})$ и обеспечивающего поступление не менее $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ свежего воздуха в помещения.

Воздухонепроницаемые слои могут выполняться: внутренний из легкого плотного бетона с $\gamma_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$ или из тяжелого бетона с $\gamma_0 = 2500 \text{ кг/м}^3$; наружный слой из цементно-песчаного раствора.

Одно- и двухслойные могут применяться в южных районах с величиной градусо-суток не более 2000. В более северных районах целесообразно применять фасадные системы с эффективным утеплителем (пенобетон) (рис. 2) и вентилируемым воздушным зазором (рис. 3).

Эти конструкции состоят из внутреннего несущего слоя из железобетона, кирпича или легкого бетона, слоя эффективного утеплителя (пенобетон), воздушного вентилируемого зазора и экрана. Приток воздуха осуществляется через специальные отверстия внизу воздушной прослойки. Вытяжка воздуха из прослойки осуществляется в летнее время через верхние отверстия в наружном слое, в зимнее время через отверстия сверху внутренних слоев, снабженные регулирующими клапанами, закрываемыми в летний период. Таким образом, достигается повышение тепло-

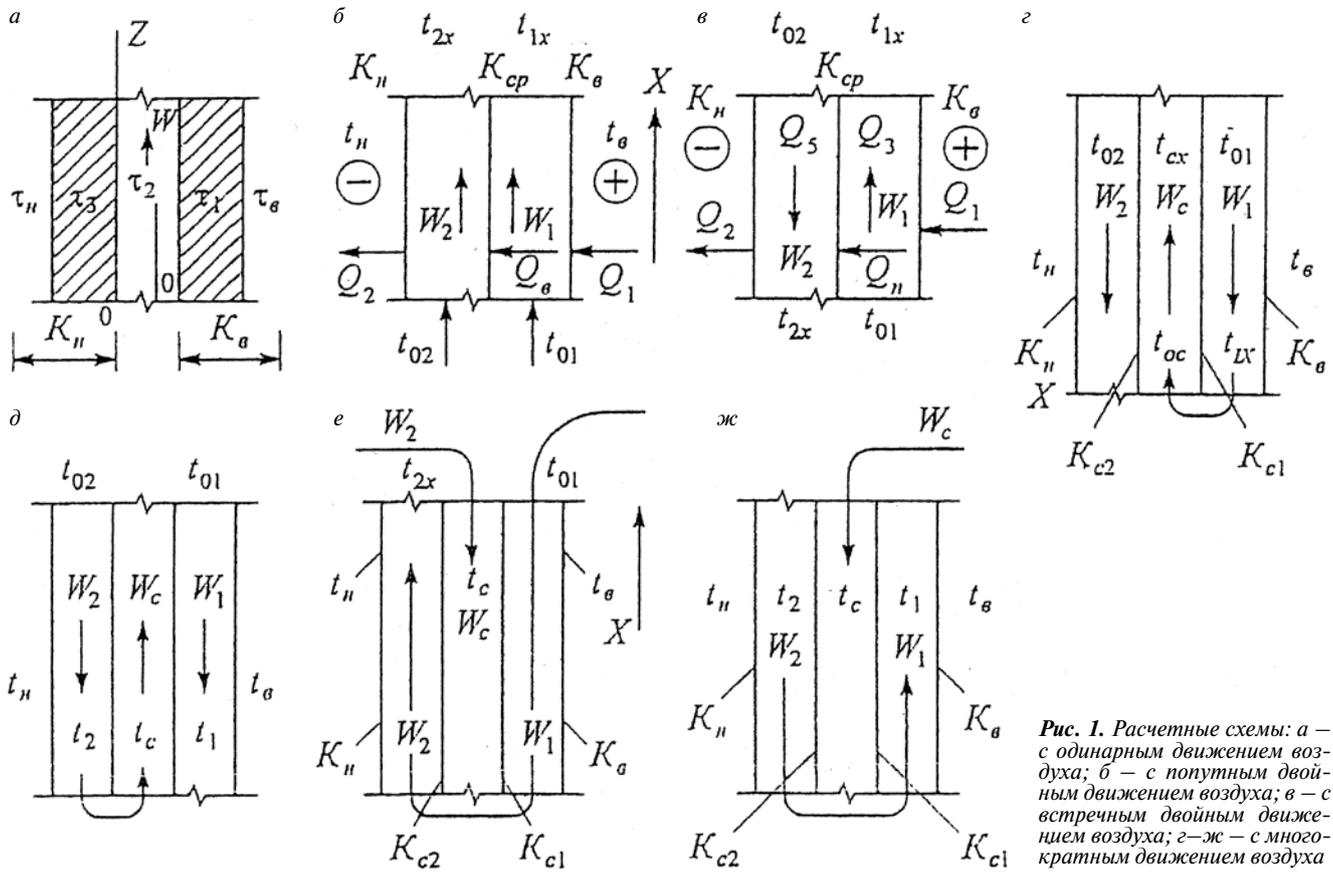


Рис. 1. Расчетные схемы: а – с одинарным движением воздуха; б – с попутным двойным движением воздуха; в – с встречным двойным движением воздуха; г – ж – с многократным движением воздуха

устойчивости стен в летнее время и экономия тепла в зимнее время. С внутренней стороны экран должен иметь низкий коэффициент излучения. Для этого в прослойку помещается теплоотражающий экран либо теплоотражающим экраном должна стать внутренняя поверхность экрана, имея низкий коэффициент излучения.

Воздуховыводящие щели экрана, служащие для вывода воздухом избытка тепла из прослойки наружу в летнее время, устанавливаются выше (не менее 200 мм), чем приточный канал.

В конструкциях вентилируемых наружных стен, выполненных из мелкоштучных строительных материалов (из кирпича и небольших блоков), выполнение сквозных технологических проемов для установки приточных каналов во внутреннем слое основания стены не вызывает особых трудностей. В железобетонных конструкциях сквозные технологические отверстия могут быть сделаны следующими способами.

В технологические проемы и отверстия устанавливаются вентиляционные короба с клапанами, которые покрываются краской, имеющей низкий коэффициент излучения.

Конструирование наружных стен с организованным воздухообменом для жилых зданий основывается на современных нормах, требующих 3 м³/ч воздуха на 1 м² жилой площади или 30 м³/ч на одного человека (комнату). Количество воздуха, необходимого для проветривания помещения через вытяжные каналы кухонь и санузлов, может возрасти от 30 до 150 м³/ч. Исходя из изложенного выше определяется необходимая площадь (F) сечения и количество (n) устанавливаемых приточных каналов в простеночной части конструкции стены в зависимости от площади помещения.

При открытых приточных клапанах конструкции в зимний эксплуатационный период нагрузка на отопление уменьшается за счет возвращения части трансмиссионного уходящего тепла фильтрующимся воздухом. По мере закрывания регулирующих клапанов количество воздуха, поступающего в помещение, уменьшается, и воздух начинает поступать традиционным путем, через щели в окнах и форточки.

Толщины экранов, размеры (сечения) воздухозаборных щелей, поперечные сечения воздушной прослойки и каналов, толщина теплоизоляции определяются расчетом в зависимости от климатического района строительства и требуемого воздухообмена помещений. Экран рекомендуется делать утепленным, а внутренняя его поверхность должна иметь низкий коэффициент излучения.

Рассмотренные выше рекомендации касаются НОРТ-1 в основном вентиляционных стен. Между тем теплопотери через окна выше, чем через стены. Актуально применение для теплозащиты окон аналогичных решений, основанных на вышеупомянутом эффекте рекуперации теплового потока (рис. 3).

Рекомендации по применению вентилируемых окон

В процессе анализа современных технических решений жилых зданий и систем вентиляции выявлены наиболее простые и эффективные методы проветривания, обеспечивающие улучшение воздухообмена и уменьшение отрицательного воздействия радона. На основе анализа данных экспериментальных исследований разработаны технические решения вентилируемых окон, имеющих вентиляционные устройства.

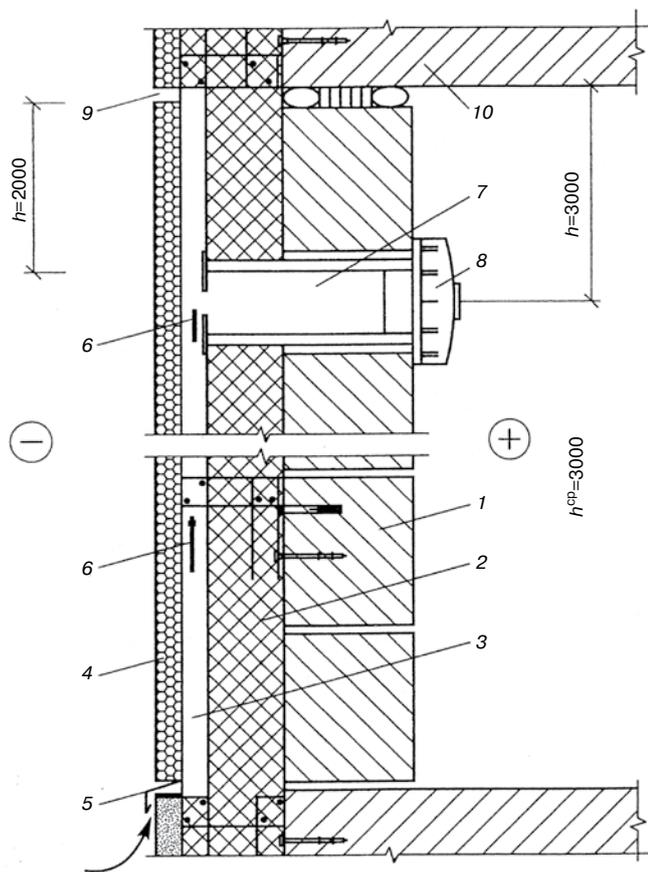


Рис. 2. Конструктивные варианты наружной стены с организованным воздухообменом и схема расположения расчетных участков и приточного канала в стене: а – конструктивный вариант стены с монолитным железобетонным основанием и с утепленным экраном из фасадной теплоизолирующей панели системы «Полиалпан»; б – стена с двухслойным основанием из эффективного кирпича и железобетонным экраном; в – схема расположения расчетных участков и приточного канала в стене, вид изнутри; 1 – внутренний слой, основание; 2 – утеплитель (пеностекло); 3 – вентилируемая прослойка; 4 – экран; 5 – атмосфера; 6 – помещение; 7 – воздухозаборная щель; 8 – приточный канал; 9 – воздушный фильтр; 10 – регулируемый клапан; 11 – направление движения воздуха; 12 – воздухоотводящая щель наружного слоя (экрана); 13 – система воздуховода; 14 – крепежные элементы фасадных систем

Оконный блок содержит большую остекленную створку и узкую створку, включающую клапан или форточку. Межстекольное пространство с большой остекленной створкой соединено с узкой посредством отверстия или щели, расположенной в вертикальном импосте. Большая и узкая створки при отсутствии импоста могут быть разделены любым экраном с отверстиями или щелью.

Вентилируемые клапаны и окна, в которых использовано решение, позволяют обеспечить вентиляцию помещения необходимым количеством прогретого воздуха за счет того, что воздух, проходя по межстекольному пространству, прогревается теплом, идущим из помещения, и поступает через сквозной проем в клапане в помещение.

В лаборатории теплового и воздушного режима зданий ЦНИИЭП жилища определены экспериментальным путем теплотехнические свойства вентилируемых окон с рекуперацией тепла.

Испытанию подвергалось окно с тройным остеклением в отдельных переплетах (ГОСТ 11214–86 «Окна и балконные двери деревянные с двойным остеклением для жилых

и общественных зданий») размером 1460×1320 мм с широкой створкой и узкой разрезной створкой, имевшими с внутренней стороны стеклопакет. В окне с внутренней стороны наружного стекла была помещена металлизированная полиэтилен-терефталатная (ПЭТФ) пленка, разработанная ОАО «МИПП» – НПО «Пластик». Узкая створка, кроме того, имела стеклопакет и в наружном переплете.

Металлизированные пленки могут быть изготовлены с алюминиевым слоем различной толщины, при этом при толщине слоя 0,045–0,065 мкм интегральное светопропускание пленки в видимой области спектра равно 0, а степень черноты со стороны металла примерно 0,035–0,04. С уменьшением толщины слоя алюминия до 0,015–0,01 мкм увеличивается светопропускание пленки (до 0,33–0,43) и степень черноты (примерно до 0,23–0,6). Для испытания были выбраны пленки, имеющие средние показатели (табл. 1).

Носителями лучистой энергии являются электромагнитные колебания с длиной волны от малых долей микрона до многих километров.

К лучам, возникновение которых определяется только температурой и оптическими свойствами излучающего тела, относятся световые и инфракрасные лучи с длиной волны от 0,4 до 800 мкм. Эти лучи называются тепловыми, а процесс их распространения – тепловым излучением, или радиацией.

Изменение спектральной интенсивности излучения абсолютно черного тела в зависимости от длины волны и температуры характеризуется законом Планка, по которому с повышением температуры максимум излучения смещается в сторону более коротких волн. Связь между температурой и длиной волны, при которой энергия излучения достигает максимума, устанавливает закон Вина.

В помещениях и ограждающих конструкциях зданий тепловое излучение происходит при ограниченном диапазоне температур и соответствует узкому интервалу изменения длин волн.

В качестве усредненной принимаем длину волны, соответствующую максимальной интенсивности излучения λ_{\max} . Ее величина в соответствии с законом Вина равна:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}$$

Длины волн, соответствующие температуре +20°C, находятся в узком диапазоне 9,9–11,5 мкм.

При различной длине волны коэффициент отражения со стороны пленки можно представить в виде таблицы:

Длина волны λ , мкм	3,9	5	5,84	6,3	7,46	8,21	9,15	10,35	11,85	13,89
Коэффициент отражения, ρ	0,47	0,55	0,59	0,59	0,63	0,67	0,67	0,68	0,7	0,7

Таким образом, при длине волны $\lambda=10$ мкм коэффициент отражения со стороны пленки $\rho=0,68$.

Отношение энергии собственного излучения тела к энергии излучения абсолютно черного тела при той же температуре называется степенью черноты ϵ . Согласно закону Кирхгофа коэффициент поглощения и степень черноты поверхности численно равны между собой, т. е. $a=\epsilon$. Спектральная степень черноты теплоотражающего стекла со стороны пленки при $\lambda=10$ мкм равна $\epsilon_s=0,32$, и коэффициент его излучения равен $C_s=\epsilon \cdot C_0=0,32 \cdot 5,75=1,84$ Вт/(м²·К⁴), где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

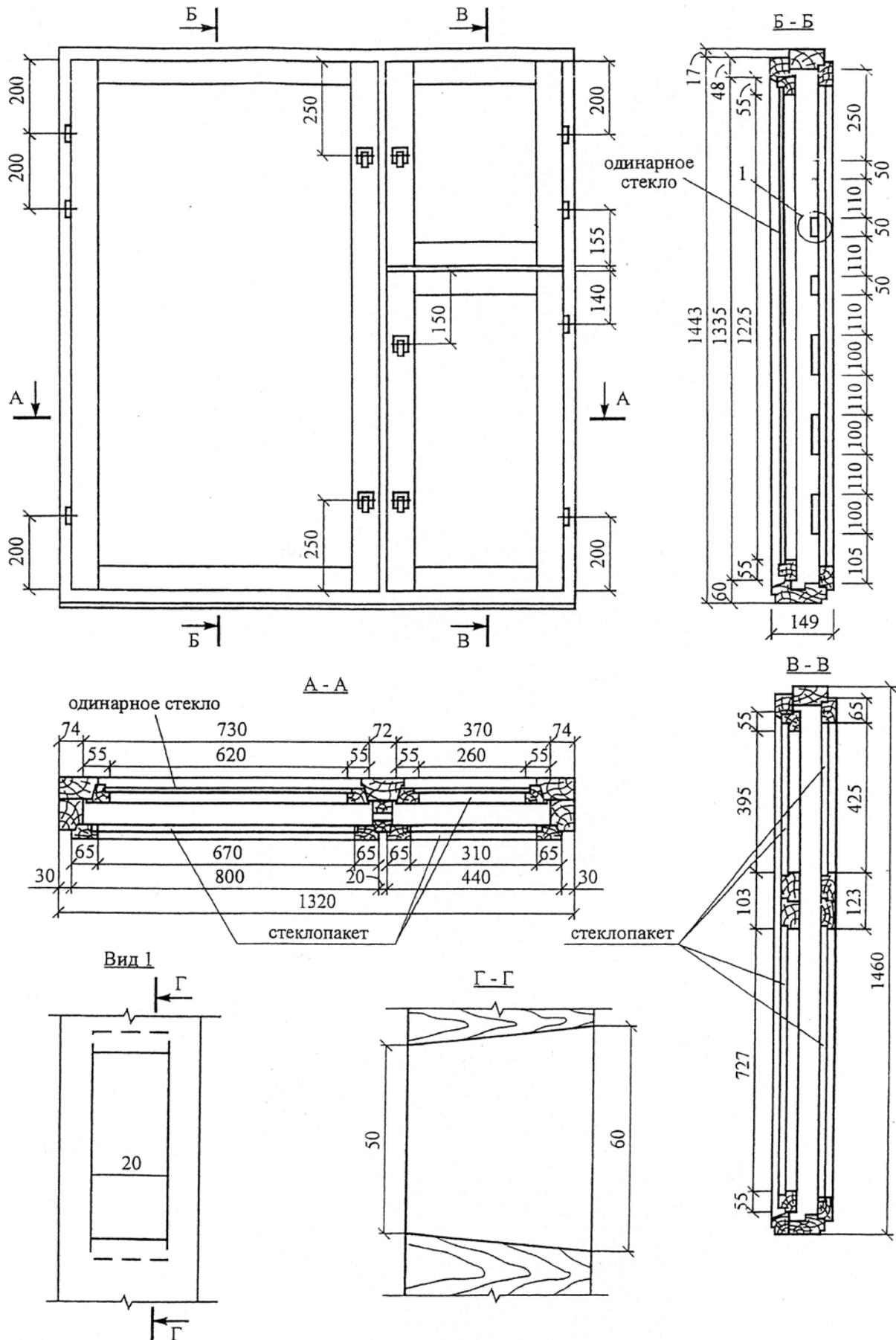


Рис. 3. Вентилируемое окно с рекуперацией тепла

Таблица 1

Оптические свойства примененных пленок

Тип пленки	Толщина пленки, мкм	Толщина слоя алюминия, мкм	Коэффициент светопропускания	Степень черноты при $t_b=20^\circ\text{C}$	
				со стороны алюминия	со стороны, обратной алюминию
Пленка ПЭТФ (серебристая)	20	0,02–0,04	0,093	0,09	0,64

Для решения вопроса, где устанавливать – во внутреннем или наружном переплете и обращать ли его пленкой наружу, в межстекольное пространство, или в сторону помещения, проанализировано влияние различных вариантов установки пленки на сопротивление теплопередаче остекленной части окна и на температуру его внутренней поверхности.

Сопротивление теплопередаче остекленной части окна $R_{\text{ост}}^{\text{ост}}$ (без учета малых величин термических сопротивлений стекол) определяется по формуле:

$$R_{\text{ост}}^{\text{ост}} = \frac{1}{\alpha_n} + R_{\text{вп}} + \frac{1}{\alpha_v},$$

где: $\frac{1}{\alpha_v}; \frac{1}{\alpha_n}$ – коэффициент теплообмена у наружной и внутренней поверхностей окна 25 и 10 Вт/(м²·°C) соответственно; $R_{\text{вп}}$ – термическое сопротивление воздушной прослойки $\approx 0,17 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; $R_n = \frac{1}{\alpha_n}$; $R_v = \frac{1}{\alpha_v}$ – сопротивление теплопередаче внутренней и наружной поверхностей окна.

Увеличение величин $R_n, R_{\text{вп}}, R_v$ за счет снижения теплопередачи излучением (вследствие уменьшения коэффициента излучения поверхностей стекол) может быть достигнуто размещением теплоотражающей пленки соответственно на наружной поверхности наружного стекла, на одной из поверхностей воздушной прослойки и на внутренней поверхности внутреннего стекла.

Величина R_n – наименьшая из трех составляющих, к тому же она в значительной степени зависит от скорости ветра, поэтому некоторое ее увеличение вследствие уменьшения теплопередачи излучением незначительно скажется на повышении общего сопротивления теплопередаче остекления.

В теплопередаче воздушной прослойки и в теплоотдаче у внутренней поверхности большая часть теплопередачи (60–70%), приходится на излучение, поэтому целесообразно ее уменьшать. Из величин $R_{\text{вп}}$ и R_v более рационально, снижая теплопередачу излучением, повышать большую – $R_{\text{вп}}$, для чего теплоотражающую пленку следует размещать на одной из поверхностей воздушной прослойки.

Такое расположение пленки приводит к повышению температуры внутренней поверхности остекления $t_{\text{в}}$, в то время как расположение пленки со стороны помещения, повышая R_v , приводит к понижению $t_{\text{в}}$, что обуславливает образование конденсата на внутренней поверхности окна.

Теплопотери вследствие теплопроводности и конвекции при прослойках соответствующей толщины независимо от коэффициентов излучения их поверхностей постоянны. Теплопотери же излучением при уменьшении коэффициента излучения одной поверхности уменьшаются значительно.

Принципиальным отличием методики испытаний вентилируемых окон с рекуперацией тепла от обычных является обязательное наличие тепломеров на наружной поверхности для замеров уходящих тепловых потоков, так как тепловой эффект этих стен заключается в возвращении в помещение части уходящего тепла.

Если оценивать теплозащиту наружного ограждения только по внутреннему тепломеру, то при фильтрации через окно холодного воздуха приведенное сопротивление теплопередаче $R'_{\text{ов}}$ будет уменьшаться, и тем более, чем больше расход воздуха, так как $R'_{\text{ов}} = \Delta t / Q_{\text{в}}^{\text{вх}}$.

При замерах теплозащиты вентилируемых ограждений с рекуперацией тепла (возвращением тепла обратно в помещение) наблюдается обратная картина при замерах тепломером, установленным с наружной стороны ограждения.

При фильтрации воздуха вдоль прослойки уходящий тепловой поток, замеренный наружным тепломером $Q_{\text{н}}^{\text{вх}}$, уменьшается тем более, чем больше расход воздуха. Приведенное сопротивление теплопередаче $R'_{\text{он}}$, рассчитанное по наружному тепломеру, увеличивается, поскольку $R'_{\text{он}} = \Delta t / Q_{\text{н}}^{\text{вх}}$.

В обычной стене (окне) суммарный расход тепла складывается из трансмиссионного теплового потока, выходящего через стену (окно) (Q_0), и затрат тепла на нагрев воздуха, требуемого для естественной вентиляции:

$$Q_0^c = Q_0 + Q_v, \quad (1)$$



Рис. 4. Камера для теплофизических испытаний: а – внутренний вид; б – наружный вид; 1 – электросчетчик; 2 – вентилятор; 3 – микрометр; 4 – теплое отделение; 5 – холодное отделение

Таблица 2

Значения термических характеристик вентилируемого энергосберегающего окна

W, кг/ч м³/ч	Q по стеклу, выходящий в холодное отделение*, Вт·ч	Δt, °C	Q _{пр} ** по электро- счетчику***, Вт	R ₀ по стеклу, м²·°C/Вт	R ₀ ^г приведенное по всему окну, м²·°C/Вт	Наличие тепло- отражающего экрана -, +	Форточка закрыта (-) открыта (+)	
							на 1 см	полностью
17/14	32	38,5	260	1,3	1,15	-	+	-
24/20	35	38	330	1,2	1,15	-	+	-
18/15	43	38	270	1,03	0,98	-	+	-
41/34,2	36 (32)	37	580	1,2	1,13 (1,15)	-	+	-
-	70	39	85	0,67	0,7	-	-	-
-	44	39	75	0,95	0,95	+	-	-
17/14	19,8 (17)	39	250	1,96	1,64 (2,3)	+	+	-
50/42	10 (7)	37	565	4,25	3,45 (5,3)	+	+	-
42/35	14 (12)	40	530	3,28	2 (3,3)	+	+	-
16,5/13,5	30 (36)	35	205	1,34	1,25 (0,97)	-	+	-
43/36	40 (32)	35	476	1,05	1 (1,09)	-	-	+
24/20	40 (36)	35	318	1	0,97 (0,9)	-	-	+
-	42 (36)	35	70	0,9	0,95 (0,9)	+	-	-
22/18	32 (19)	35	250	1,26	1,2 (1,8)	+	-	+
32/27	23 (10,8)	35	340	0,47	1,4 (3,2)	+	-	+
28/23	18 (16)	30	320	1,9	1,5 (1,8)	+	-	+

Примечания.
* Над чертой даны показания по тепломерам. Под чертой в скобках – по электросчетчику, в том числе учитываемые вне опытного образца.
** Компенсация всех теплопотерь, включая вентиляционные.
*** Остекленность окна 65%.

где Q_i – расход теплоты, Вт, на нагревание инфильтрующегося воздуха следует определять по формуле:

$$Q_i = 0,28 \cdot \Sigma W \cdot c \cdot (t_b - t_n) \cdot k_c, \quad (2)$$

где W – расход инфильтрующегося воздуха, кг/ч, через конструкцию окна; c – удельная теплоемкость воздуха, равная 1 кДж/(кг·°C); t_b, t_n – расчетные температуры воздуха, °C, соответственно в помещении и наружного воздуха в холодный период года (параметры Б).

В вентилируемой стене (окне) суммарный расход тепла при фильтрации воздуха через окно (Q_u^c) складывается из входящего теплового потока ($Q_u^{вх}$) и дополнительных затрат тепла ($Q_u^д$) на нагрев инфильтрующегося воздуха от температуры выходящего воздуха ($t_{вых}$) до температуры внутреннего воздуха (t_b):

$$Q_u^c = Q_u^{вх} + Q_u^д, \quad (3)$$

где $Q_u^д = c \cdot W \cdot (t_b - t_{вых})$.

Входящий тепловой поток можно выразить через выходящий тепловой поток:

$$Q_u^{вх} = Q_u^{вхх} + Q_u^з,$$

где $Q_u^з$ – теплотраты на нагрев инфильтрующегося воздуха в прослойке – экономайзерный эффект инфильтрации.

За счет этого эффекта выходящий через наружный слой тепловой поток в вентилируемой стене (окне) может быть значительно меньше, чем в невентилируемой:

$$Q_u^з = c \cdot W \cdot (t_{вых} - t_n). \quad (4)$$

После подстановки приведенных формул в значение $Q_u^{сх}$ получим:

$$Q_u^c = Q_u^{вхх} + c \cdot W \cdot (t_b - t_n) \cdot k_c. \quad (5)$$

Теплотехнические испытания окон выполнялись в лабораторных условиях в климатической камере (рис. 4). В стене, разделяющей камеру на теплое и холодное отделение, устанавливалось окно. Испытания проводились в два этапа. На первом этапе окно испытывалось в варианте без теплоотражающей пленки, а на втором – то же окно, но с теплоотражающей пленкой. Температура воздуха в холодном отделении равнялась -15–20°C, температура в теплом отделении климатической камеры +20°C (равнялась температуре вне камеры). Испытания проводились при отсутствии фильтрации и при инфильтрации воздуха через окна.

Первым способом определения термических характеристик опытных конструкций являлся способ определения тепловых потоков с помощью тепломеров.

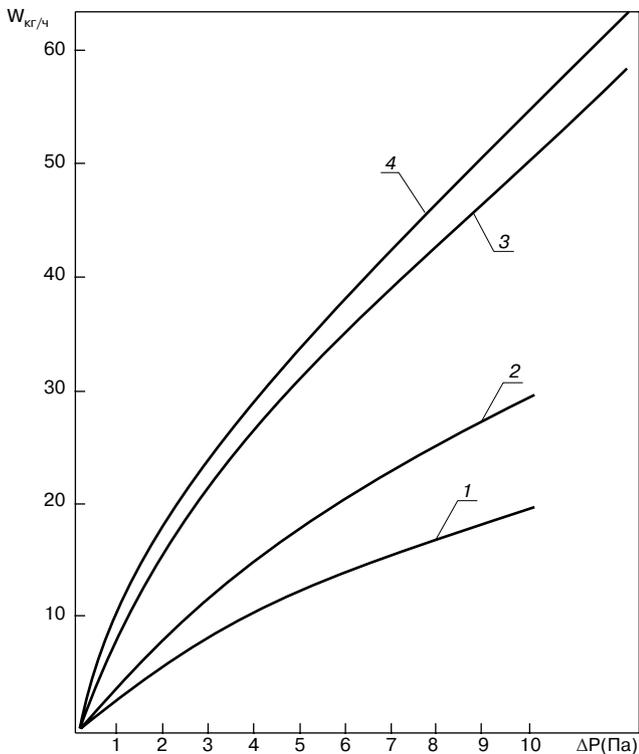


Рис. 5. Изменение расхода воздуха в зависимости от разности давления для вентилируемого окна: 1 — одно нижнее отверстие открыто, как и внутренняя форточка, на 10 мм; 2 — то же, что в п. 1, но форточка открыта полностью; 3 — два нижних отверстия открыты, форточка открыта на 10 мм; 4 — как в п. 3, но форточка открыта полностью

Второй способ основан на определении приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока по температурам внутреннего и наружного воздуха и интегральному тепловому потоку, соответствующему расходу электроэнергии, компенсирующей теплопотери через окно.

Второй способ дает возможность, определив по расходу электроэнергии, компенсирующей теплопотери через опытное ограждение, интегральный тепловой поток, вычислить приведенное сопротивление теплопередаче окна.

Перед испытаниями камера тарировалась, т. е. определялись термические сопротивления всех участков, через которые уходило тепло помимо образца.

Температуры воздуха и поверхностей окна измерялись дистанционно с помощью термпар и вольтметра, а локальные тепловые потоки — с помощью тепломеров.

Были проведены испытания вентилируемого окна, изображенного на рис. 3. Окно имело стеклопакет во внутреннем переплете большой створки и два стеклопакета во внутреннем и наружном переплетах узкой створки.

До начала теплотехнических испытаний окна испытывались на воздухопроницаемость, в результате чего строились графики зависимости расхода воздуха через окно от перепада давлений по обе стороны окон (рис. 5). Коэффициент воздухопроницаемости через одно нижнее отверстие в импосте 23–24,6 м³/ч (10 Па)^{0,85}.

Окно испытывалось как при наличии фильтрации вдоль прослойки, так и без нее. Для обеспечения продольной вентиляции и определения эффекта рекуперации открывалась внутренняя форточка (наружная была закрыта).

Температура в теплом отделении камеры равнялась температуре вне камеры.

Найденные по второму способу приведенные сопротивления теплопередаче окон составляли 0,65 м²·°С/Вт при отсутствии пленки и 0,95 м²·°С/Вт при ее наличии, т. е. применение металлизированной пленки, по данным электросчетчика, повышало (без вентиляции окна) сопротивление теплопередаче примерно в 1,5 раза.

Вентиляция воздушной прослойки при наличии теплоотражающей пленки существенно повышает условное сопротивление теплопередаче окна (по наружному тепломеру). При инфильтрации определено условное сопротивление оконного блока, необходимое для подсчета полных теплопотерь за счет трансмиссионной теплопередачи и за счет нагрева инфильтрующегося воздуха. Установлено, что при наличии продольной фильтрации воздуха при его сопоставимых расходах $R_0^{усл}$ окна с пленкой более $R_0^{усл}$ окна без пленки в 2–3 раза.

Среднее условное приведенное сопротивление теплопередаче по выходящим тепловым потокам достигало 3–4 м²·°С/Вт.

В табл. 2 и на рис. 6 показано изменение выходящего измеренного теплового потока (по наружному тепломеру) и приведенного сопротивления теплопередаче (по остекленной части) в зависимости от расхода воздуха через вентилируемую воздушную прослойку окна при наличии и отсутствии теплоотражающей пленки.

На рис. 6 видно, что с увеличением расхода воздуха в его диапазоне от 0 до 70–50 кг/ч происходит существенное уменьшение выходящего теплового потока с 70 до 10 Вт/м².

Данный эффект коррелируется с теоретическими и экспериментальными исследованиями конструкций при поперечной фильтрации воздуха, проведенными Ф.В. Ушковым и В.С. Беляевым.

В натуральных условиях (в феврале) были проведены экспериментальные исследования трехстворчатого окна в жи-

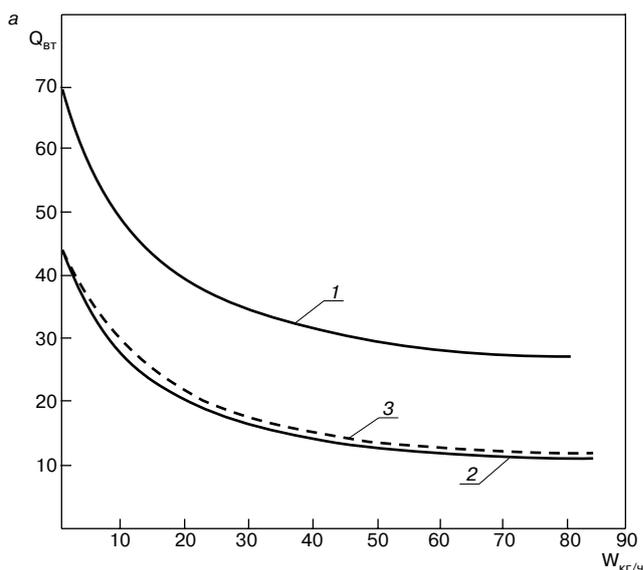


Рис. 6. Изменение теплового потока (по тепломерам), уходящего от наружной поверхности вентилируемого окна $Q_{внх}$ в зависимости от расхода воздуха вдоль воздушной прослойки: 1 — без теплоотражающей пленки; 2 — при наличии теплоотражающей пленки в наружной прослойке при открытой на 10 мм внутренней форточке; 3 — то же, что в п. 2, при открытой форточке полностью

Таблица 3
Расчет теплового эффекта трехстворчатого вентилируемого окна
(натурные условия)

Схема движения воздуха		Др, Па	$Q_{o}^{вых}$, Вт/м ²	$Q_{и}^{вых}$, Вт/м ²	$Q_{o}^{вых} - Q_{и}^{вых}$, %
Вид снаружи	Вид изнутри				
		3	49,57	34,26	30
		5	49,57	41,76	17
		2	49,57	44,5	11
		2	49,57	48,07	3
		2	49,57	39,14	22

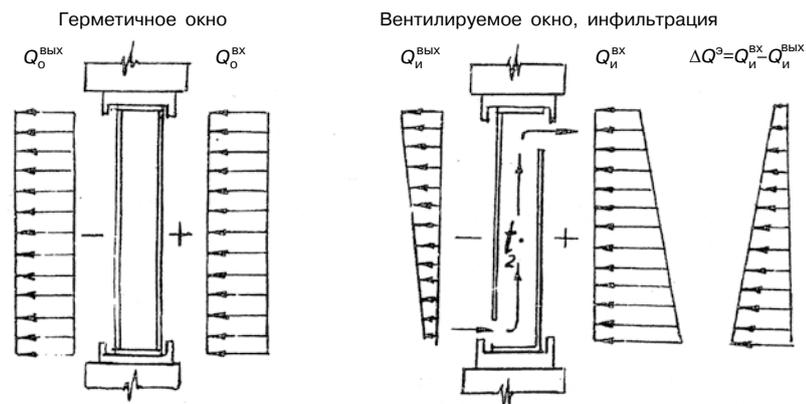


Рис. 7. Распределение входящего и выходящего тепловых потоков по высоте герметичного и вентилируемого окон

лой комнате на 5 этаже 9-этажного панельного дома. Исследовано шесть вариантов конструктивных решений вентилируемого окна и вариант невентилируемого обычного окна. Продолжительность испытания каждого варианта равнялась трем дням. Замеры производились круглосуточно. Температура наружного воздуха колебалась в пределах -5°C , перепад давления от 2 до 6 Па.

Все варианты вентилируемого окна испытывались при наружной закрытой и внутренней открытой форточках. При наличии инфильтрации воздух заходил в межстекольное пространство окна через отверстия и неплотности наружного переплета окна. Отверстия в импостах давали возможность воздушному потоку проходить из межстекольного пространства одной створки в межстекольное пространство другой и затем выходить в комнату через форточку. Форточка была открыта максимально. Устройство отверстий в импосте на различной высоте, а также изменяемое количество входящих отверстий давали возможность вариации путей движения воздуха.

В табл. 3 приведены средние значения теплового эффекта по всем вариантам конструкций окон. Ограничение количества входящих отверстий положительно сказывается на значении теплового эффекта при незначительном уменьшении расхода воздуха.

Так, среднее значение теплового эффекта ΔQ в I варианте на 13% больше, чем во II, в III – на 8% больше, чем в IV. Имеет значение расположение промежуточных отверстий в импосте. Отверстия в нижней трети высоты импоста оказались более эффективными, чем в верхней его части: тепловой эффект ΔQ в I варианте на 19% больше, чем в III, а во II – на 15% больше, чем в IV (испытания окна в климатической камере вентилируемого окна при наличии теплоотражающей пленки показали увеличение теплового эффекта до 80%).

Наибольшим (30%) оказался тепловой эффект в I варианте конструкции (без теплоотражающей пленки), когда воздух заходил только в одну широкую створку. Это можно объяснить тем, что в нижнем сечении тепловой поток $Q_u^{вх}$, проходящий через внутреннее остекление, уменьшается по высоте и в нижнем сечении имеет большее значение. Это подтверждается формулой $Q_u^{вх} = K_B(t_B - t_2)$ – с увеличением t_2 ($t_2 < 0$) $Q_u^{вх}$ уменьшается. Подтверждается это и экспериментально. Для теплового потока, проходящего через наружное остекление $Q_u^{вых}$, зависимость обратная, и в нижнем сечении $Q_u^{вых}$ меньше, чем в верхнем сечении (рис. 7). Разность этих потоков ($Q_u^{вх} - Q_u^{вых}$) = $Q^э$, которая используется для обогрева фильтрующегося воздуха, максимальна в нижнем сечении.

Теоретические положения расчетов вентилируемых наружных ограждений с рекуперацией тепла (НОРТ)

Сложность теплотехнического расчета вентилируемых стен и окон заключается в многомерности теплопередачи в узлах, осложненной к тому же фильтрацией воздуха. В первой части дается алгоритм расчета температурного поля $u(x, y)$ среднего бокового сечения на примере окна (рис. 8).

Во второй части приводится решение задач теории теплоустойчивости конструкций, в том числе с воздушной вентилируемой прослойкой.

Теплопередача по закону Ньютона:

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial \bar{u}} - \alpha \cdot (u - u_o) = 0, \quad (6)$$

где u_o – температура окружающей среды; λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент теплообмена.

Постановка задачи. Определить стационарное распределение температуры внутри вентилируемого окна с заданными крайними условиями.

Решение ищется по аналогии с определением температурного поля в стыке [2].

Исходные данные: $t_{in}, t_b, t_o, x, \alpha, y, M, N, \delta$.

Построение матричного уравнения

Примем: h, l – шаги соответственно по оси x, y .

Линейное уравнение, соответствующее уравнению Лапласа для температур внутри прямоугольника:

$$(u_{m+1n} - 2u_{mn} + u_{m-1n}) + \frac{h^2}{l^2} (u_{mn+1} - 2u_{mn} + u_{mn-1}) = 0. \quad (7)$$

Вектор $\bar{u}_n = (u_{1n}, u_{2n}, u_{3n} \dots u_{m-1n})$,

$$-1 < m < M-1, 1 < n < N-1, l = \frac{M}{N}, H = \frac{\delta}{M}.$$

Для вектора \bar{u}_1 система:

$$\left. \begin{aligned} u_{21} - 2(1+j)u_{01} + u_{10} + ju_{12} &= 0 \\ u_{31} - 2(1+j)u_{21} + u_{11} + ju_{20} + ju_{22} &= 0 \\ u_{41} - 2(1+j)u_{31} + u_{21} + ju_{30} + ju_{32} &= 0 \\ \dots & \\ u_{m1} - 2(1+j)u_{m-11} + u_{m-21} + ju_{m-10} + ju_{m-12} &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow, \quad (8)$$

или в матричной форме:

$$A_1 = \begin{vmatrix} -2(1+j) + \frac{\lambda}{\lambda+h\alpha} & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & -2(1+j) & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2(1+j) & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2(1+j) + \frac{\lambda}{\lambda+h\alpha} \\ -2(1+j) + \frac{\lambda}{\lambda+h\alpha} & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & -2(1+j) & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2(1+j) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2(1+j) + \frac{\lambda}{\lambda+h\alpha} \end{vmatrix},$$

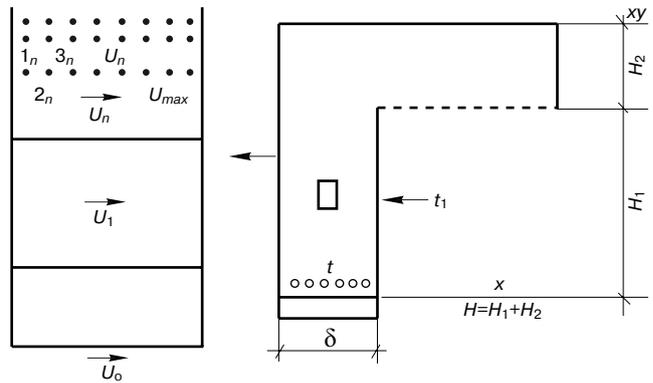


Рис. 8. Схема для расчета температурного поля $u(x, y)$ среднего бокового сечения окна

$$A_1 \bar{u}_1 = -j\bar{u}_2 - j\bar{u}_o - \bar{c}_1,$$

где \bar{u}_o и \bar{c}_1 – вектора, соответствующие крайним условиям $u_o = (t_o, t_o, t_o, \dots, t_o)$,

$$\bar{c}_1 = \left(\frac{\alpha h t_{in}}{\lambda + h\alpha}, 0, 0, \dots, 0, \frac{\alpha h t_o}{\lambda + h\alpha} \right),$$

$$A_1 = \begin{vmatrix} -2(1+j) + \frac{\lambda}{\lambda+h\alpha} & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & -2(1+j) & 1 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2(1+j) + \frac{\lambda}{\lambda+h\alpha} \end{vmatrix}.$$

Для любого вектора $A_n \bar{u}_n = -j\bar{u}_{n+1} - j\bar{u}_{m+1} - \bar{c}_n$.

Система матричных уравнений для всей плоскости имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} A_1 \bar{u}_1 &= -j\bar{u}_1 - j\bar{u}_o - \bar{c}_1 \\ A_1 \bar{u}_2 &= -j\bar{u}_3 - j\bar{u}_1 - \bar{c}_1 \\ \dots & \\ A_1 \bar{u}_n &= -j\bar{u}_{n+1} - j\bar{u}_{n-1} - \bar{c}_1 \\ A_1 \bar{u}_{n+1} &= -j\bar{u}_{n+2} - j\bar{u}_n - \bar{c}_1 \\ \dots & \\ A_1 \bar{u}_{N-1} &= -j\bar{u}_{N+1} - j\bar{u}_{N-2} - \bar{c}_1 \end{aligned} \right. \begin{cases} y \leq H_1 \\ \text{или} \\ nl = H_1 \\ y > H_1 \end{cases} \quad (9)$$

Система (9) решается методом матричной прогонки.

Вид матриц и векторов $A_1, \bar{c}_1, A_1, \bar{c}_1$:

$$C_{01} = \begin{vmatrix} -j & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -j & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -j \end{vmatrix}$$

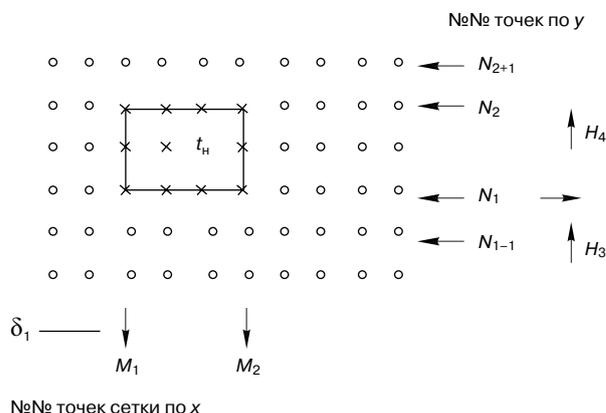
$$C_{02} = \begin{vmatrix} -j & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -j & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \hline M_1 & \text{нули} & & & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & \dots & -j & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & M_{2+1} & -j \end{vmatrix}$$

$$C = (в C_1, 0, 0, \dots, 0, \underset{\downarrow M_1}{jt_u}, \underset{\downarrow M_2}{jt_u}, jt_u, 0, \dots в C_1)$$

Данный метод не учитывает продольное перераспределение струи воздуха с одновременным теплообменом. Уравнение должно иметь вид:

$$a^2 \Delta u + F = 0,$$

где F – неизвестная функция по W .



Представленный метод дает наиболее точное решение в сечениях, близких к плоскости с отверстием в импосте (конфигурация струи должна быть близка к начальной), и в случае, если W_1 и W_2 велики по сравнению со средними скоростями броуновского движения. Для оценочных расчетов модель вполне пригодна.

Кроме указанной возможна и одномерная модель.

При этом рассматривается температурное поле только за счет движения воздуха через отверстие импоста. Возможности применения: W_1, W_u велики; $\delta \ll H$.

В данной модели нельзя учесть размеры импоста.

При учете больших скоростей воздуха через отверстия импоста возможна двумерная модель, при этом струи че-



ЦНИИЭП жилища Центральный научно-исследовательский и проектный институт жилых и общественных зданий

предлагает

Стандарт организации «Энергоэффективность и теплозащита зданий»
СТО 01922789–13

В СТО 01922789–13 представлены требования к энергоэффективности и теплозащите зданий, современные методы теплотехнических расчетов в соответствии с новым СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий». Актуализированная редакция СНиП 23-02.

Приведены методики расчета и определения продольной и поперечной воздухопроницаемости, введенной в СП 50.13330.2012.

В институте также разработаны «Рекомендации по проектированию энергоэкономичных жилых и общественных зданий с применением наружных ограждений с рекуперацией тепла», где изложены основные положения теплового проектирования таких зданий, технические решения элементов наружных стен, результаты испытаний, представлены основы теории, методики и примеры расчетов, выявлены закономерности изменения теплового эффекта.

Для приобретения СТО и Рекомендаций обращайтесь к руководителю работ
Беляеву Владимиру Сергеевичу

Телефоны: (499) 976-40-35, (499) 254-67-53

E-mail: gabreel4@li.ru

рез нижние отверстия идут по периметру, поддерживая постоянную t_0 , а струя через отверстие импоста не меняет конфигурацию.

В обеих последних моделях расчета решается уравнение Лапласа типа (7) с заданными краевыми условиями. Приведенная выше постановка метода расчета не исключает возможности решения по методу Навье—Стокса.

Заключение

Выявлен тепловой эффект и зависимости его от расхода воздуха в вентилируемых окнах предлагаемой конструкции. При соответствующих условиях эксплуатации условное сопротивление теплопередаче окон R_{op} приблизится к R_{or} по глухой части стены.

Имеет принципиальное значение размещение теплоотражающего покрытия на внешней стороне воздушной прослойки ограждения или расположение там теплоотражающего экрана, что дает повышение тепловой эффективности в 2–3 раза и более по сравнению с обычным стеклом с возможностью доведения теплозащиты окна до глухой части стены.

Вторым важным условием эффективности предлагаемого решения является стабильность поступления необходимого количества воздуха через вентилируемое окно в помещение, поскольку тепловой эффект рассматриваемой системы зависит от величины расхода проходящего через нее воздуха.

При этом рекомендуется рассмотреть возможность объединения предлагаемой системы приточной вентиляции с

рекуперацией трансмиссионного тепла с системой с рекуперацией вентиляционного тепла. Суть такого решения и методы его расчета после вопросов теории теплоустойчивости НОРТ будут представлены в следующей статье.

Список литературы

1. *Беляев В.С., Хохлова Л.П.* Проектирование энергоэкономичных и энергоактивных зданий. М.: Высшая школа. 1991. 300 с.
2. *Беляев В.С.* Теплопередача через стыки наружных стен крупнопанельных зданий при двухмерной фильтрации воздуха // *Жилищное строительство*. 2013. № 7. С. 16–20.



Подписка на электронную версию

Актуальная информация для всех работников
строительного комплекса

ЖИЛИЩНОЕ
СТРОИТЕЛЬСТВО

<http://ejournal.rifsm.ru/>

2-4 октября 2013г

Совместно с выставкой
“Энергоресурс”
г.Воронеж,
ул.Ворошилова, 1а,
спорткомплекс “Энергия”

37-я межрегиональная специализированная **ВЫСТАВКА**
СТРОИТЕЛЬСТВО

5-я межрегиональная специализированная **ВЫСТАВКА**
НОВЫЙ ГОРОД

stroy@veta.ru
energo@veta.ru
www.veta.ru

тел.: (473) 251-20-12

При поддержке:
Правительства Воронежской области
Администрация городского округа г.Воронеж
НП “Союз строителей Воронежской области”
Ассоциация экономического взаимодействия
субъектов РФ Центрального Федерального округа
“Центрально-Черноземная”
Воронежский государственный
архитектурно-строительный университет

Организаторы:

Генеральный спонсор выставки:

Официальный информационный партнер:

Генеральный аналитический партнер:

Информационный спонсор выставки:

Ведущий интернет-партнер:

Официальный интернет-партнер: