

УДК 697.1:69.022.3

*А. М. ПРОТАСЕВИЧ, канд. техн. наук, Белорусский национальный технический университет;  
А. Б. КРУТИЛИН, зав. сектором теплофизических исследований РУП «Институт БелНИИС»  
(Минск, Республика Беларусь)*

## Аэродинамический расчет вентилируемых фасадных систем зданий со сплошными экранами

*Описана методика аэродинамического расчета ВВП на основании решений уравнений балансов теплоты и влаги с учетом результатов, полученных при натурных и стендовых исследованиях ВФС теплоизоляции зданий. Предложены блок-схемы расчета скорости воздуха в прослойке и возможности выпадения конденсата на внутренней поверхности защитного экрана. Методика апробирована на расчетах ВВП стен зданий, на которых были выполнены натурные аэродинамические и теплотехнические исследования.*

**Ключевые слова:** вентилируемый фасад, воздушная прослойка, тепломассоперенос, влажность, скорость воздуха в прослойке, теплопотери.

Одной из основных задач современной строительной отрасли является уменьшение потребления энергии на эксплуатацию зданий и сооружений различного назначения. Решение указанной задачи связано со снижением расхода теплоты на поддержание микроклимата в помещениях, следовательно, с уменьшением теплопотерь через наружные ограждающие конструкции путем увеличения их сопротивления теплопередаче.

С использованием в конструкциях наружных стен зданий эффективных теплоизоляционных материалов возрастают требования по формированию их влажностного режима, исключающего накопление влаги. Устройством вентилируемых фасадных систем (ВФС) утепления является способом теплоизоляции, обеспечивающим формирование влажностного режима путем организации удаления диффундирующей влаги движущимся в прослойках воздухом.

Проектирование ВФС утепления связано с выполнением расчета геометрических характеристик вентилируемой воздушной прослойки (ВВП). Ошибки в выборе геометрических размеров прослоек, а также входных и выходных отверстий могут привести к нарушению их аэродинамического режима и, как следствие, к конденсации водяного пара на внутренней поверхности экранов, возникновению слоя инея или наледи в зимний период эксплуатации зданий.

В настоящее время известны многочисленные экспериментальные и теоретические работы по исследованию тепловлажностного режима наружных стен зданий с вентилируемыми прослойками и фасадными системами теплоизоляции. Это работы советских ученых К.Ф. Фокина, В.Д. Мачинского, В.С. Беляева, В.Н. Богословского, А.Ф. Хомутова, В.И. Лукьянова. Современные ВФС утепления исследованы российскими учеными В.Г. Гагариным, В.В. Козловым, В.А. Езерским, А.Н. Машенковым, О.Д. Самариным и др. Наружные стены с ВВП и защитными экранами изучены канадскими и американскими исследователями J. Straube, G. Finch, E. Burnett, немецкими учеными E. Mayer

и H. Kunzel, а также учеными из Литвы, Дании, Бельгии и др. стран.

В работах перечисленных авторов исследовались влияние элементов крепления экрана и слоя теплоизоляции на теплозащитные свойства наружных стен, динамика изменения влажности материалов при их эксплуатации, аэродинамический режим прослоек в различных климатических условиях, фильтрация воздуха в слое теплоизоляции. Предложены методики теплотехнического расчета наружных стен с ВВП, а также с ВФС теплоизоляции.

В то же время анализ предлагаемых методов расчета показывает различный подход их авторов к определению вида теплообмена и режима движения воздуха в вентилируемых прослойках [1, 2 и др.], выбору критерия оценки проектирования по исключению образования слоя инея или наледи. Не во всех методах полноценно учитываются потери давления на трение при движении воздуха в ВВП, а также дополнительные теплопритоки в прослойку через теплопроводные включения стен.

В представленной работе предложен метод расчета геометрических параметров ВВП, разработанный на основе решения уравнений балансов теплоты и влаги для зимнего периода года с учетом результатов многочисленных натурных и стендовых исследований ВФС теплоизоляции зданий [3, 4]. Метод основан на рассмотрении стационарного режима переноса теплоты и массы.

Нахождение скорости движения воздуха в вентилируемых прослойках ВФС утепления со сплошными защитными экранами выполняется для условий его движения за счет гравитационного давления методом последовательного приближения (итераций). Критерием сходимости принята температура на внутренней поверхности защитного экрана, так как на ее величину влияют все пересчитываемые в циклах итерации параметры (гравитационное давление, скорость движения воздуха в ВВП, коэффициенты теплообмена на поверхностях прослойки, распределение температуры по толщине стены и т. д.).

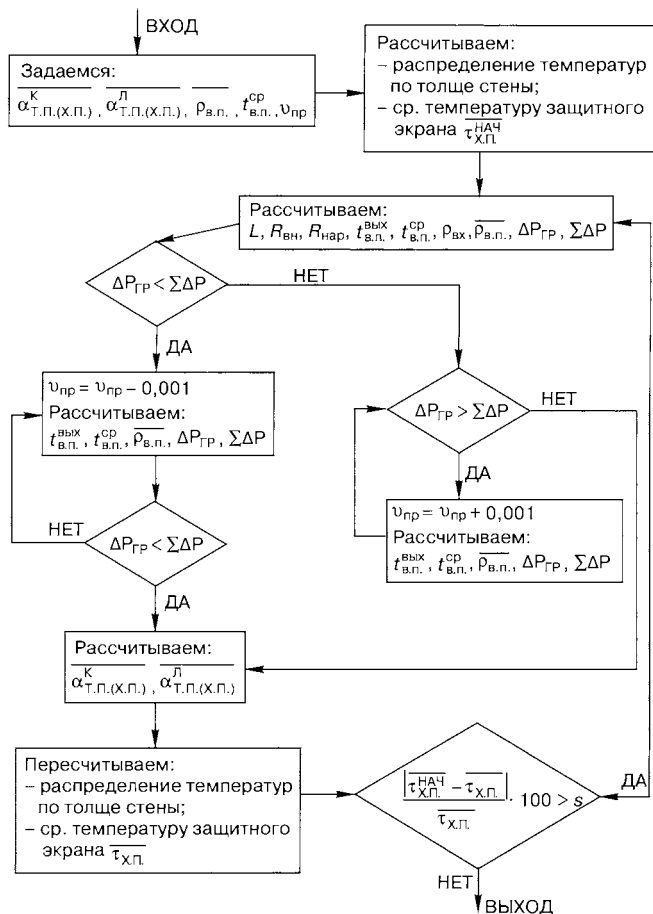


Рис. 1. Блок-схема расчета скорости воздуха в ВВП ВФС утепления

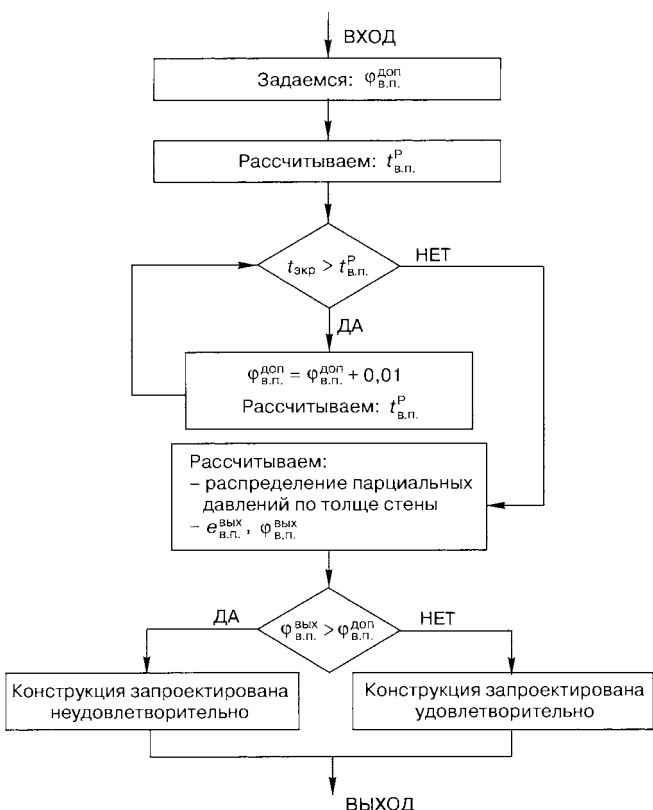


Рис. 2. Блок-схема проверки на возможность выпадения конденсата на внутренней поверхности экрана ВФС утепления

Расчет выполняется с использованием предварительно задаваемых условий по двум блок-схемам (рис. 1, 2). По первой блок-схеме рассчитывается скорость воздуха в прослойке, по второй – наличие или отсутствие конденсации водяного пара на внутренней поверхности защитного экрана.

Расчет скорости воздуха в ВВП выполняется в следующей последовательности.

1. Задаются в первом приближении коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена теплой и холодной поверхностей прослойки ( $\alpha_{т.п.}^к, \alpha_{х.п.}^к, \alpha_{т.п.}^л, \alpha_{х.п.}^л$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°C)), средняя температура и плотность воздуха ( $t_{в.п.}^{ср}$ , °C и  $\rho_{в.п.}$ , кг/м<sup>3</sup>), а также скорость движения воздуха ( $v_{пр}$ , м/с) в ней. Рассчитывается распределение температур по толще стены и средняя температура внутренней поверхности защитного экрана ( $\overline{t_{х.п.}}$ , °C).

2. Определяются расход воздуха в ВВП ( $L$ , м<sup>3</sup>/ч), условные сопротивления теплопередаче внутренней и наружной частей конструкции ( $R_{вн}$  и  $R_{нар}$ , м<sup>2</sup>·°C/Вт), температура воздуха на выходе из ВВП ( $t_{в.п.}^{вых}$ , °C) и средняя по высоте прослойки, плотности воздуха на входе в прослойку и средняя по ее высоте; гравитационное давление ( $\Delta P_{гр}$ , Па) и суммарные потери давления при движении воздуха ( $\Sigma \Delta P$ , Па).

3. Если величина гравитационного давления меньше величины суммарных потерь давления, то скорость движения воздуха циклически, с шагом 0,001 м/с уменьшается, пока гравитационное давление не станет больше суммарных потерь давления.

Если гравитационное давление больше величины суммарных потерь давления, то скорость движения воздуха циклически, с шагом 0,001 м/с увеличивается, пока величина гравитационного давления не станет равным или меньше суммарных потерь давления.

При выполнении циклических увеличений или уменьшений скорости движения воздуха в ВВП в каждом цикле пересчитываются: температура воздуха на выходе из ВВП и его средняя температура в прослойке; средняя плотность воздуха в ВВП; гравитационное давление; суммарные потери давления при принятой в цикле скорости движения воздуха в прослойке.

4. Пересчитываются коэффициенты лучистого и конвективного теплообмена теплой и холодной поверхностей ВВП, распределение температуры по толще стены и средняя температура на внутренней поверхности защитного экрана.

5. Сравняются новое значение средней температуры на внутренней поверхности экрана с предыдущим, рассчитанным в пункте 2, и если получено различие более чем  $s = 1\%$ , то осуществляется переход к пункту 2 и расчеты выполняются заново.

Основные зависимости физических величин, используемые для расчетов в циклах итераций, представлены ниже.

Средняя температура на внутренней поверхности экрана находится по уравнению (1), полученному из равенства притекающего теплового потока к внутренней поверхности экрана и уходящего теплового потока через экран:

$$\overline{t_{х.п.}} = t_{в.п.}^{ср} - \frac{t_{в.п.}^{ср} - t_n}{\left( \frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{экр}}{\lambda_{экр}} + \frac{1}{\alpha_{х.п.}} \right)} \cdot \overline{\alpha_{х.п.}} \quad (1)$$

Поскольку для экранов из металла отношение  $\delta_{\text{эк}}/\lambda_{\text{эк}}$  значительно меньше остальных величин в знаменателе, формула (1) преобразовывается к виду:

$$\tau_{\text{х.п.}} = t_{\text{в.п.}}^{\text{ср}} - \frac{t_{\text{в.п.}}^{\text{ср}} - t_{\text{н}}}{\frac{\alpha_{\text{х.п.}}}{\alpha_{\text{н}}} + 1} \quad (2)$$

Средняя температура воздуха по высоте определяется по формуле (3), полученной решением уравнения теплового баланса ВВП [5]:

$$t_{\text{в.п.}}^{\text{ср}} = t_{\text{н}} - \frac{(t_{\text{н}} - t_{\text{в}}) \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h \cdot b \cdot (\alpha_{\text{т.п.}}^{\text{к}} + \alpha_{\text{х.п.}}^{\text{к}})\right)}{0,28 \cdot c_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в.п.}} \cdot L}\right]}{h \cdot b \cdot (\alpha_{\text{т.п.}}^{\text{к}} + \alpha_{\text{х.п.}}^{\text{к}}) / (0,28 \cdot c_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в.п.}} \cdot L)} \quad (3)$$

где  $t_{\text{н}} = \frac{t_{\text{в}} \cdot R_{\text{нар}} + t_{\text{н}} \cdot R_{\text{вн}}}{R_{\text{нар}} + R_{\text{вн}}}$ ;  $R_{\text{вн}} = \left( \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{т.п.}}^{\text{к}}} \right) \cdot r$ ;  
 $R_{\text{нар}} = \frac{1}{\alpha_{\text{х.п.}}^{\text{к}}} + \frac{\delta_{\text{эк}}}{\lambda_{\text{эк}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}$ ;  $t_{\text{в}}$ ,  $t_{\text{н}}$  – температуры соответственно наружного и внутреннего воздуха, °С;  $R_{\text{нар}}$ ,  $R_{\text{вн}}$  – условные сопротивления теплопередаче наружной и внутренней частей вентилируемого фасада, м<sup>2</sup>·°С/Вт;  $r$  – коэффициент, учитывающий дополнительный приток теплоты к воздуху ВВП через элементы крепления слоя теплоизоляции и защитного экрана;  $h$ ,  $b$ ,  $\delta$  – соответственно высота, ширина и толщина ВВП, м;  $c_{\text{в}}$  – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С).

Потери давления при движении воздуха в прослойке находятся по уравнению:

$$\sum \Delta P = R_{\text{н}} + \sum_{i=1}^n \xi_{\text{с}i} \cdot \frac{\rho_{\text{в.п.}} \cdot v_{\text{пр}}^2}{2} \quad (4)$$

где  $R_{\text{н}}$  – потери давления на трение по высоте ВВП,  $R_{\text{н}} = R_{\text{л}} h$ , Па;  $R_{\text{л}}$  – удельные потери на трение при соответствующей скорости движения воздуха в ВВП, Па;  $\sum \xi_{\text{с}i}$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Удельные потери на трение в зависимости от скорости движения воздуха в прослойках толщиной  $\delta = 20-100$  мм у ВФС с металлическими гладкими экранами определены на основании лабораторных испытаний и рассчитываются по формуле:

$$R_{\text{л}} = v_{\text{пр}} \cdot (1,27 - 0,012 \cdot \delta) \quad (5)$$

Оценка принятых геометрических размеров ВВП производится по определению наличия или отсутствия конденсации водяного пара на внутренней поверхности защитного экрана. Для этого рассчитывается максимальная допустимая относительная влажность воздуха в ВВП, при которой не будет конденсации водяного пара на хо-

лодной поверхности экрана в следующей последовательности (рис. 2).

1. Задается величина допустимой относительной влажности воздуха в ВВП ( $\varphi_{\text{в.п.}}^{\text{доп}}$ , %) заведомо ниже интервала ее возможных действительных значений.

2. По рассчитанной температуре воздуха на выходе из ВВП и принятой относительной влажности воздуха в прослойке определяется температура точки росы ( $t_{\text{в.п.}}^{\text{р}}$ , °С).

3. Если температура на холодной поверхности экрана выше температуры точки росы, то принятое значение допустимой относительной влажности воздуха в ВВП циклически, с шагом в 1% увеличивается, пока температура точки росы не превысит температуру на холодной поверхности экрана.

4. Рассчитывается распределение парциальных давлений водяного пара по толще наружной стены, парциальное давление водяного пара воздуха на выходе из прослойки ( $e_{\text{в.п.}}^{\text{вых}}$ , Па) и относительная влажность воздуха на выходе из ВВП ( $\varphi_{\text{в.п.}}^{\text{вых}}$ , %).

Превышение относительной влажности на выходе из ВВП над максимально допустимой, рассчитанной из условия недопустимости конденсата на внутренней поверхности экрана означает, что необходимы корректировка геометрических размеров ВВП или другие конструктивные решения, направленные на снижение потока водяного пара в прослойку.

Парциальное давление водяного пара воздуха на выходе из ВВП определяем на основании решения уравнения баланса влаги в прослойке:

$$e_{\text{в.п.}}^{\text{вых}} = \bar{e}_{\text{т}} - (\bar{e}_{\text{т}} - e_{\text{н}}) \cdot \exp\left(-\frac{h \cdot \beta_{\text{в.п.}}}{\rho_{\text{в.п.}} \cdot L \cdot 1,5526}\right) \quad (6)$$

где  $\bar{e}_{\text{т}}$  – средняя по высоте прослойки величина парциального давления на теплой поверхности ВВП;  $\beta_{\text{в.п.}}$  – средний по высоте прослойки коэффициент массообмена поверхности стены, обращенной к воздуху ВВП, мг/(м<sup>2</sup>·ч·Па), определяемый в соответствии с [6].

Для расчетов циклических алгоритмов по последовательному приближению искомых величин составлена программа на языке Объект Pascal в среде объектно-ориентированного программирования.

Расчеты по изложенной выше методике с использованием результатов натурных теплотехнических исследований ВФС теплоизоляции дали расхождение в определяемых величинах до 15%.

По предлагаемой методике выполнена оценка влияния климатических параметров и геометрических характеристик ВВП на величину скорости движения воздуха в ней, а также условий образования конденсата или наледи на поверхности защитного экрана. В настоящей работе расчеты выполнены для наружной стены жилого дома ( $t_{\text{в}} = +18^{\circ}\text{C}$ ,

$t_{\text{в}}$ , °С	$\alpha_{\text{х.п.}}^{\text{к}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	$\alpha_{\text{т.п.}}^{\text{к}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	$v_{\text{пр}}$ , м/с	$t_{\text{в.п.}}^{\text{вых}}$ , °С	$t_{\text{в.п.}}^{\text{ср}}$ , °С	$\sum \Delta P$ , Па	$\tau_{\text{х.п.}}$ , °С	$\varphi_{\text{в.п.}}^{\text{доп}}$ , %	$\varphi_{\text{в.п.}}^{\text{вых}}$ , %	Возможность конденсации
-25	2,33	2,31	0,300	-20,17	-21,82	2,65	-24,17	70,3	89,6	да
-15	2,19	2,09	0,245	-11,07	-12,25	2,12	-14,28	77,2	78,2	да
-5	2,01	1,83	0,184	-2,08	-2,81	1,57	-4,42	84,0	75,8	нет
+5	1,74	1,50	0,116	+6,79	+6,46	0,98	+5,38	90,7	78,9	нет

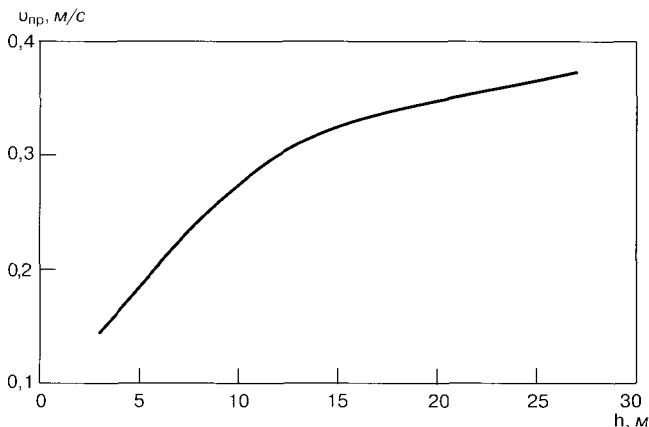


Рис. 3. Зависимость скорости движения воздуха в ВВП ( $\delta = 60$  мм;  $t_n = -25^\circ\text{C}$ ) от высоты прослойки

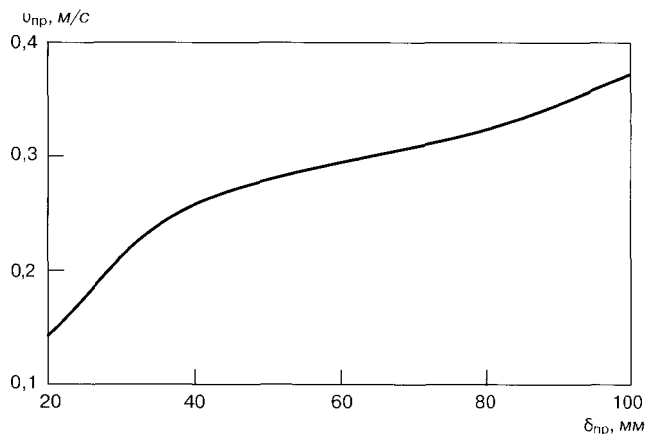


Рис. 4. Зависимость скорости движения воздуха в ВВП ( $h = 15$  м;  $t_n = -25^\circ\text{C}$ ) от толщины прослойки

$\phi_v = 55\%$ ) из керамзитобетонных стеновых панелей толщиной 300 мм с ВФС утепления.

Система утепления имеет сплошной металлический защитный экран и слой теплоизоляции из плит минераловатных плотностью  $130 \text{ кг/м}^3$ , толщиной 140 мм. Крепления слоя теплоизоляции к панелям предусмотрено дюбелями с металлическими сердечниками, а защитного экрана – на кронштейнах. Коэффициент теплотехнической однородности системы утепления принят равным  $r = 0,8$ ; приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены  $R_T = 3,2 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$ . В ВФС предусмотрено одно входное и одно выходное отверстие; сумма коэффициентов местных сопротивлений при движении воздуха принята равной  $\sum \xi_i = 2,8$ , ширина ВВП – 1 м. Остальные геометрические размеры, а также температура наружного воздуха в ходе расчетов варьируются.

Некоторые результаты расчетов для ВВП толщиной  $\delta = 60$  мм и высотой  $h = 15$  м приведены в таблице.

Для принятой температуры наружного воздуха на поверхности экрана возможна температура как выше точки росы вентилируемого воздуха, так и ниже. Насыщение потока воздуха парами влаги происходит в слоях, примыкающих к внутренней поверхности экрана. В ядре потока воздух остается ненасыщенным.

Суммарные потери давления при движении воздуха за счет гравитационного давления зависят от скорости потока. При этом потери давления за счет трения могут составлять более 90%.

Варьирование геометрическими размерами прослойки позволяет выполнить анализ влияния высоты ВВП при фиксированной толщине ( $\delta = 60$  мм) и наружной температуре воздуха  $t_n = -25^\circ\text{C}$  (рис. 3), а также толщины прослойки при фиксированной высоте ( $h = 15$  м) и наружной температуре воздуха  $t_n = -25^\circ\text{C}$  (рис. 4) на скорость воздушного потока. В обоих рассматриваемых случаях изменение геометрических размеров прослойки влияет на скорость потока, которая лежит в пределах  $u_{пр} = 0,1\text{--}0,4$  м/с.

Таким образом, разработана методика аэродинамического расчета ВВП на основании решений уравнений балансов теплоты и влаги с учетом результатов, полученных при натурных и стендовых исследованиях ВФС теплоизоляции зданий. Предложены блок-схемы расчета скорости воздуха в прослойке и возможности выпадения конденсата на внутренней поверхности защитного экрана.

Методика апробирована на расчетах ВВП стен зданий, на которых были выполнены натурные аэродинамические и теплотехнические исследования. Расхождение расчетных и экспериментальных величин не более 15%.

Выполнена оценка влияния геометрических размеров прослойки на примере наружной стены жилого дома из керамзитобетонных панелей с ВФС утепления на ее аэродинамический режим и условия конденсации влаги на внутренней поверхности защитного экрана.

Анализ полученных данных показывает, что допустимая относительная влажность потока воздуха на выходе из ВВП ниже 100%, т. е. критерий  $e_{вн}^{вх} < E_{ан}^{вх}$  не может быть использован в качестве оценочного для принятия геометрических размеров прослоек ВФС утепления со сплошным экраном.

#### Список литературы

1. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Методика проверки выпадения конденсата в воздушном зазоре вентилируемого фасада. В кн: «Строительная физика в XXI веке: Материалы научно-технической конференции» / Под ред. И.Л. Шубина. М.: НИИСФ РААСН, 2006. С. 73–80.
2. Самарин О.Д. Теплофизические и технико-экономические основы теплотехнической безопасности и энергосбережения в здании. М.: МГСУ, 2007. 160 с.
3. Протасевич А.М., Крутилин А.Б., Якимович Д.Д. Теплоизоляция наружных стен зданий по системе вентилируемый фасад // Жилищное строительство. 2006. № 6. С. 8–13.
4. Протасевич А.М., Крутилин А.Б. Натурные исследования наружных стен зданий, теплоизолированных по системе «вентилируемый фасад»: Современные фасадные системы: эффективность и долговечность: Материалы научно-технической конференции. Москва, 21 ноября 2008 г. С. 212–217.
5. Протасевич А.М., Крутилин А.Б. Тепловой режим вентилируемых воздушных прослоек фасадных систем // Строительные материалы. 2007. № 6. С. 13–15.
6. Переголенцев А.Г., Григоров А.Г. Зависимость коэффициентов влагообмена ограждающих конструкций зданий от ветрового режима, отнесенные к парциальным давлениям водяных паров: Материалы III научно-технической конференции. Москва, 21–23 ноября, 2009 г. С. 88–89.