

О ВЛИЯНИИ ПРОДОЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА НА ТЕПЛОЗАЩИТУ СТЕН С ВЕНТИЛИРУЕМЫМ ФАСАДОМ

С повышением требований по теплозащите зданий увеличилось применение эффективных теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях. Теплоизоляционный слой в ограждающей конструкции может располагаться с наружной стороны, в середине конструкции или с внутренней стороны, обращенной в помещение. Расположение теплоизоляционного слоя с наружной стороны ограждающей конструкции имеет ряд известных преимуществ. Однако в этом случае теплоизоляционный слой требует защиты от атмосферных воздействий.

Одно из таких решений реализовано в конструкциях, называемых вентилируемыми фасадами, где теплоизоляционный слой защищен от внешней среды экраном — облицовкой, а пространство между утеплителем и облицовкой вентилируется наружным воздухом. В таких конструкциях через пористый теплоизоляционный материал может осуществляться фильтрация воздуха.

Влияние фильтрации воздуха через ограждающие конструкции на их теплозащитные свойства исследовалось в нашей стране с конца XIX века. Существует два вида фильтрации: поперечная и продольная (кроме этого иногда рассматривают также внутреннюю фильтрацию, имея в виду конвективное движение воздуха в пористом утеплителе внутри конструкции). Метод расчета одномерного температурного поля в ограждающей конструкции при поперечной фильтрации был разработан Ф. В. Ушковым [1] и с тех пор применяется в решении ряда задач. При помощи этого метода возможно определить снижение теплозащитных свойств ограждающих конструкций за счет фильтрации воздуха.

Р. Е. Брилинг ввел понятие и определил «продольную инфильтрацию» как «явление проникновения наружного воздуха в толщу ограждения при направлении ветра, параллельном поверхности наружных ограждений» [2]. Расчеты продольной фильтрации воздуха в ограждающих конструкциях и ее влияния на теплозащитные свойства конструкций не проводилось, хотя Р. Е. Брилинг экспериментально подтвердил существование этого влияния. К. Ф. Фокин отмечал, что методы таких расчетов не разработаны, и устранять продольную фильтрацию следует строительными мероприятиями [3].

При расчете сопротивления теплопередаче стен с вентилируемыми фасадами пренебрегается влиянием фильтрации на теплоперенос и, следовательно, на теплозащитные характеристики стен. Между тем, в данной конструкции любой пористый минераловатный утеплитель непосредственно или через ветрозащитную мембрану граничит с подвижным холодным воздухом, что создает предпосылки для фильтрации воздуха в утеплителе и, соответственно, для дополнительных тепловых потерь. Продольная фильтрация в теплоизоляционном слое вентилируемых фасадов возможна прежде всего в таких частях фасада, как простенки и углы. Данное явление носит нестационарный (переменный во времени) характер, что обусловлено нестационарностью ветрового давления, однако при оценке теплозащитных свойств ограждения продольную фильтрацию приходится рассматривать как стационарный процесс.

В данной статье кратко описан подход к решению задачи учета продольной фильтрации при оценке теплозащитных свойств стен с вентилируемыми фасадами. Обсуждено также экспериментальное определение необходимых для такого расчета характеристик пористых теплоизоляционных материалов.

МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА В ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Температурное поле ограждающей конструкции описывается уравнением теплопроводности, дополненным учетом мгновенной фильтрации воздуха. Для двухмерного случая это уравнение имеет вид:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + c_a \cdot G_c \cdot \left(n_x \frac{\partial t}{\partial x} + n_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

где: x, y — координаты (м); λ_x, λ_y — расчетные коэффициенты теплопроводности по соответствующим направлениям ($\text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$); t — температура в точке с координатами x, y ($^\circ\text{C}$); c_a — удельная теплоемкость воздуха ($\text{Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$), $c_a = 1006 \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$; G_c — удельный поток воздуха через конструкцию ($\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$), $G_c > 0$; если воздух движется в положительном направлении оси координат, $G_c < 0$ — если в отрицательном.

Приведенное уравнение (1) с соответствующими граничными условиями решается в конечных разностях по явной схеме для выбранного фрагмента конструкции. Решение проводится как для уравнения нестационарной теплопроводности итерациями до достижения заданной точности.

Плотность потока воздуха через конструкцию G_c , входящая в уравнение (1), определяется формулой:

$$G_c = \frac{\Delta P \cdot i}{3600 \cdot \left(2R_{\text{в.м.}} + \frac{L}{i} \right)} = \frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{1}{\left(\frac{2R_{\text{в.м.}}}{L} + \frac{1}{i} \right)}, \quad (2)$$

где: L — длина участка конструкции, по которому движется воздух (м); ΔP — разность давлений на участке конструкции, вызывающая фильтрацию воздуха (Па); $\frac{\Delta P}{L}$ — градиент давления воздуха в теплоизоляционном слое конструкции (Па/м); i — коэффициент воздухопроницаемости теплоизоляционного материала ($\text{кг/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$); $R_{\text{в.м.}}$ — сопротивление воздухопроницанию ветрогидрозащитной мембраны ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/кг}$); $1/3600$ — размерный коэффициент, связанный с переходом от часов в коэффициенте воздухопроницаемости к секундам в плотности потока воздуха.

Величины $\Delta P, i, L$ являются параметрами, необходимыми для расчета значения G_c .

Перепад давлений ΔP принимается на основании соответствующих расчетов. Для расчетов, связанных с оценкой теплозащитных характеристик конструкций при определении энергоэффективности зданий, ΔP целесообразно рассчитывать по средним значениям скорости ветра за отопительный период. При оценке теплозащитных характеристик конструкций при экстремальных значениях температуры наружного воздуха ΔP целесообразно рассчитывать по экстремальным значениям скорости ветра для зимних условий эксплуатации. Расчет перепада давлений (ΔP) может осуществляться по инженерным методикам с учетом аэродинамических коэффициентов здания, приводимым в учебниках. Представляется, что более точно этот параметр может быть определен по расчету трех- или двухмерных полей давления ветра на фасады здания или по испытаниям в аэродинамической трубе.

В качестве значения параметра L принимается размер характерного участка конструкции, для которого необходимо провести оценку теплозащитных свойств. Например, для межоконного простенка принимается его ширина. Коэффициент воздухопроницаемости материала выбирается на основании экспериментальных исследований.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРИСТЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для проведения расчетов температурных полей фрагментов ограждающих конструкций с учетом фильтрации воздуха необходимы характеристики воздухопроницаемости материалов.

1. Уравнения воздухопроницаемости строительных материалов.

Научные исследования воздухопроницаемости в Советском Союзе были начаты Р. Е. Брилингом и Б.Ф. Васильевым в ЦНИПС в 1935 г., тогда была разработана методика и начаты систематические лабораторные исследования воздухопроницаемости строительных материалов и конструкций. К 1948 г. Р. Е. Брилинг экспериментально определил воздухопроницаемость большинства строительных материалов и распространенных конструкций стен, применяемых в то время в строительстве [2]. Р. Е. Брилингом были получены зависимости между расходом воздуха G , отнесенным к единице площади образца в виде пластины, и перепадом давлений ΔP на образце. Измерения проводились при разности давлений от 1 – 5 Па до 50 – 400 Па в зависимости от степени воздухопроницаемости образца и возможности в связи с этим установления подпора в камере. Однако практический интерес представляли разности давлений не более 50 Па, что соответствует давлению ветра, действующего на стену при скорости около 10 м/с.

Зависимость между разностью давлений и величиной расхода воздуха связана со скоростью движения, а значит и режимом течения воздуха в материале. Воздухопроницаемость материалов при разностях давлений не более 10 Па в большинстве случаев характеризуется линейной зависимостью [2]:

$$G = i \cdot \Delta P / \delta, \quad (3)$$

где: G — воздухопроницаемость образца материала (кг/м²·ч); i — коэффициент воздухопроницаемости материала (кг/м·ч·Па); ΔP — перепад давлений на образце (Па); δ — толщина образца (м).

Впоследствии в результате экспериментальных исследований различных материалов и ограждающих конструкций было показано, что в общем случае справедлива следующая зависимость между расходом воздуха G , проходящим через образец, и перепадом давлений ΔP на разных поверхностях образца:

$$G = i \cdot \Delta P^n / \delta, \quad (4)$$

где: n — показатель режима фильтрации; i — коэффициент воздухопроницаемости материала (измеряется в этом случае в кг/м·ч·Па ^{n}).

Коэффициент воздухопроницаемости материалов в приведенных уравнениях (3 и 4) определяется экспериментально.

2. Описание установки и методика проведения экспериментов.

Испытания образцов теплоизоляционных материалов на воздухопроницаемость в лабораторных условиях производятся по методике, предложенной Р. Е. Брилингом [2]. Схема установки представлена на рисунке 1.

Установка представляет собой металлическую камеру (5) с жесткими герметическими стенками с проемом для установки образца (7) и прижимной рамкой (8), компрессор (1) подключается с противоположной стороны к проему через регулировочные краны (2) и приборы (4) для измерения расхода воздуха с помощью гибких шлангов (3).

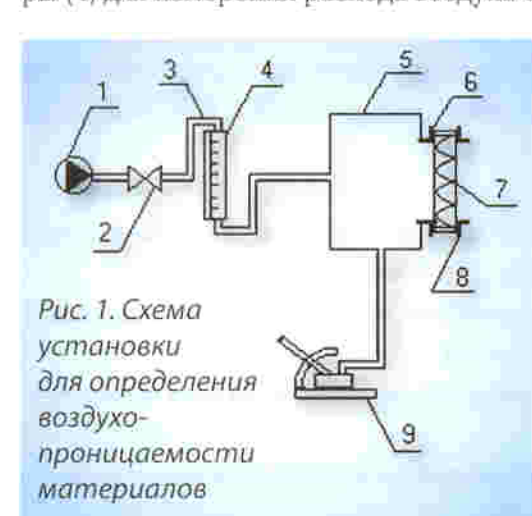


Рис. 1. Схема установки для определения воздухопроницаемости материалов

Для измерения расхода воздуха применяют ротаметр (4). Для измерения перепада давлений к камере через соединительный шланг подключают микроманометр (9). Перед испытанием образца на торцевые поверхности, а также на лицевые поверхности, выходящие за границы проема камеры, наносится герметик. Затем образец в несколько слоев об-

матывается изоляционным скотчем, чтобы избежать фильтрации воздуха через торцы образца. Образец (7) устанавливается в проем камеры и фиксируется прижимной рамкой. При испытании материалов с низкой плотностью, в частности изделий из стекловолокна, образец помещается и герметизируется в специальной торцевой рамке, чтобы при фиксировании его прижимной рамкой к камере сохранялись его геометрические размеры. Для более герметичного прижима образца по всему периметру на уголках (6) проема камеры и прижимной рамки (9) наклеена пористая резина. После установки образца его торцы снова обматываются скотчем. Внешний вид образца, установленного в камеру, показан на рисунке 2.



Рис. 2. Образец, установленный в проем камеры

Испытания проводятся в следующей последовательности. При помощи компрессора и регулирующей арматуры последовательно создаются разности давлений по обе стороны образца. Для каждого значения перепада давлений ΔP_i фиксируется (по ротаметру) значение расхода воздуха Q_i (м³/ч). По измеренным значениям Q_i рассчитываются значения воздухопроницаемости образца G_i (кг/м²·ч). Полученная таким образом совокупность экспериментальных значений $\{\Delta P_i, G_i\}$ позволяет определить коэффициент воздухопроницаемости материала.

3. Результаты экспериментального определения воздухопроницаемости минераловатных плит.

Обработка результатов экспериментов производится с учетом ГОСТ 25891-83 [4]. Вышеприведенное уравнение (4) представляется в следующем виде:

$$\ln G = n \ln \Delta P + \ln(i/\delta). \quad (5)$$

Логарифмы полученных значений воздухопроницаемости наносятся на плоскость координат в зависимости от логарифмов соответствующих перепадов давлений. Через нанесенные экспериментальные точки проводится прямая. В соответствии с уравнением (5) значение n равно тангенсу угла наклона этой прямой. Если обозначить символом b координату пересечения этой прямой с осью $\ln G$, то коэффициент воздухопроницаемости будет равен:

$$i = \delta \cdot \exp(b). \quad (6)$$

Сопротивление воздухопроницанию образца определяется по формуле:

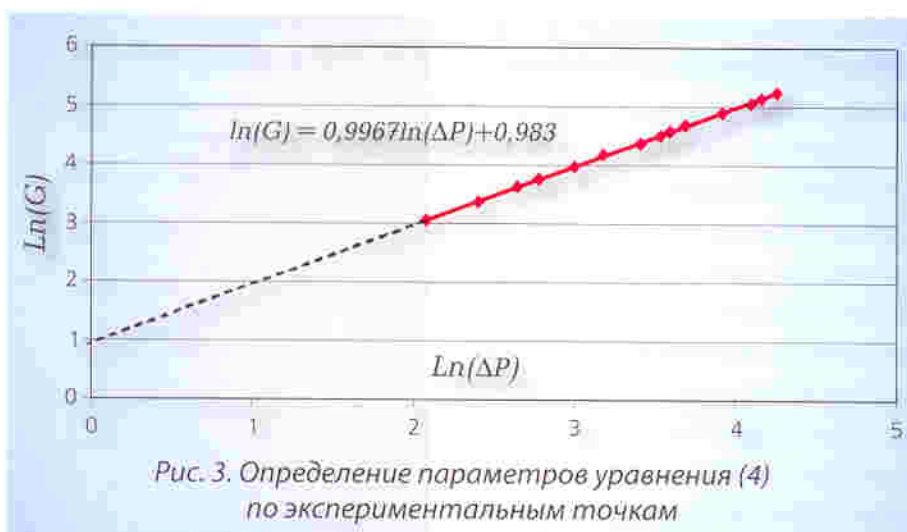
$$R_u = \frac{\delta}{i}. \quad (7)$$

По данной методике было проведено экспериментальное определение коэффициентов воздухопроницаемости минераловатных плит. На рисунке 3 приведены экспериментальные точки, нанесенные на плоскость в соответствии с уравнением (5), для образца плиты П-45 Г производства ООО «УРСА Евразия» толщиной 100 мм, через которые проведена прямая, построенная по уравнению регрессии. По приведенным на рисунке 4 данным можно отметить следующее:

- результаты экспериментального определения воздухопроницаемости образца хорошо описываются уравнением (4), поскольку они составляют прямую линию;
- показатель режима фильтрации n равен 0,9967, т. е. практически равен 1, следовательно, зависимость G от ΔP является линейной и может быть описана уравнением (3);
- значение ординаты точки пересечения графика с осью ординат составляет $b = 0,983$, следовательно, коэффициент фильтрации материала равен:

$$i = 0,1 \cdot \exp(0,983) = 0,267 \approx 0,27 \text{ кг/м·ч·Па.}$$

Таким образом, данная методика позволяет проводить экспериментальные определения коэффициентов воздухопроницаемо-



сти пористых строительных материалов, что обеспечивает возможность расчета воздухопроницаемости слоя теплоизоляции в конструкции и, следовательно, расчета температурных полей конструкций с учетом фильтрации воздуха.

РАСЧЕТЫ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ФРАГМЕНТА ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

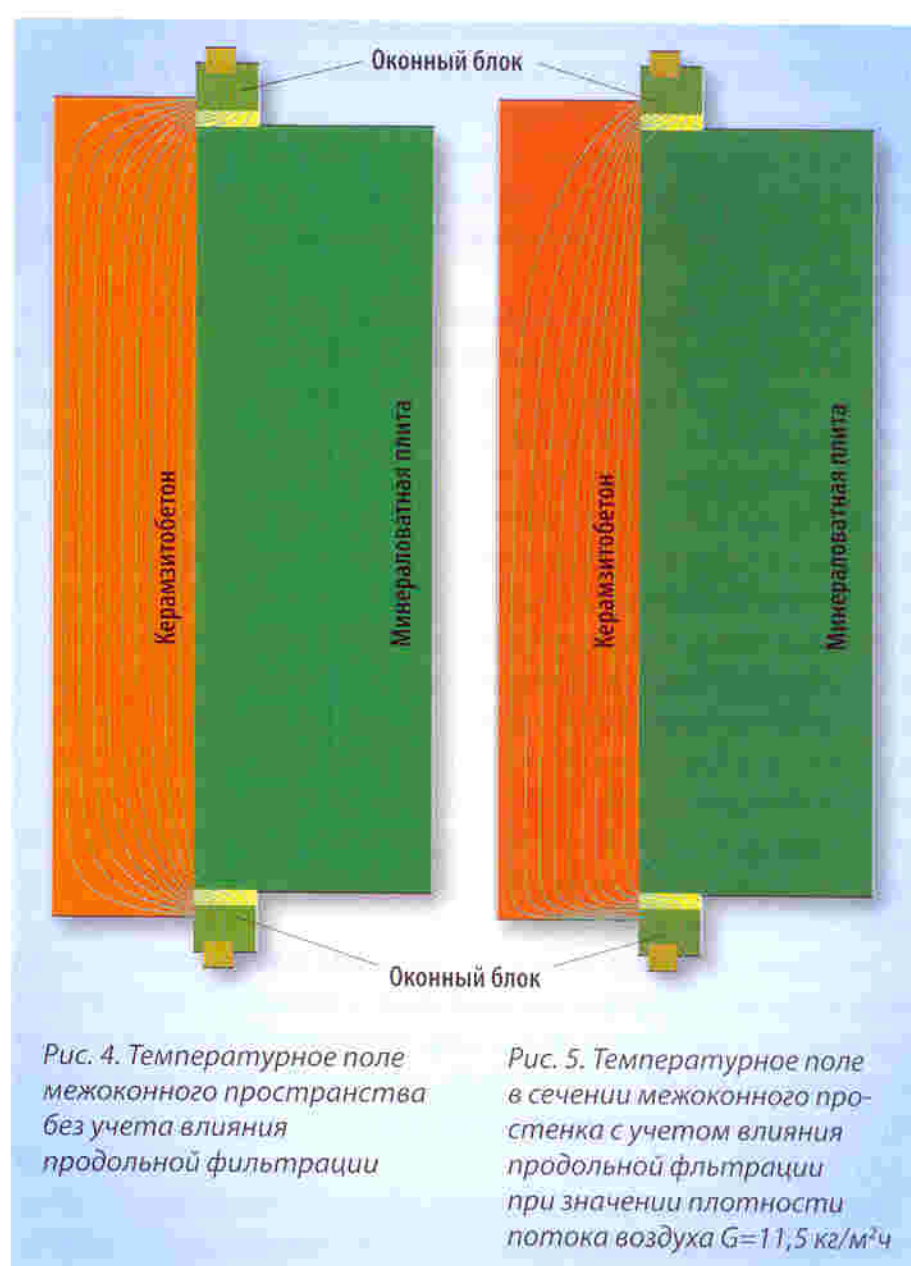
Для проведения расчетов в качестве фрагмента стеновой конструкции был выбран вертикальный межоконный простенок шириной 1 м. Конструкция стены следующая: керамзитобетонная панель толщиной 250 мм, коэффициент теплопроводности материала — $\lambda_{\text{кб}} = 0,50 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$, теплоизоляционный слой из минераловатных плит толщиной 150 мм, коэффициент теплопроводности материала — $\lambda_{\text{мвп}} = 0,045 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$. Температура наружного воздуха принята равной -28°С , внутреннего — $+20^\circ\text{С}$. Оконный блок установлен в плоскость стены, минераловатные плиты установлены с нахлестом на оконный блок в 30 мм.

Рассчитанное температурное поле рассматриваемой конструкции без учета фильтрации воздуха представлено на рисунке 4. Температурное поле представлено изотермами (линиями равной температуры), которые соответствуют температурам с шагом 4°С . По результатам расчета, поток теплоты через рассматриваемый участок конструкции составляет: $Q_0 = 17,4 \text{ Вт/м}$. Приведенное сопротивление теплопередаче составляет: $R_0^{\text{пр}} = 2,76 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С/Вт}$. Минимальная температура на внутренней поверхности оконного откоса — $+14,8^\circ\text{С}$.

На рисунке 5 представлено температурное поле рассматриваемой конструкции с учетом продольной фильтрации воздуха при значении величины плотности потока воздуха, равной $G = 11,5 \text{ кг/м}^2\cdot\text{ч}$. Такое значение G соответствует скорости ветра примерно 10 м/с и значению коэффициента воздухопроницаемости теплоизоляционного материала $0,4 \text{ кг/м}^2\cdot\text{Па}$ (такой коэффициент воздухопроницаемости характерен для минеральной ваты плотностью 30–50 кг/м³). Изолинии температурного поля деформировались вследствие влияния воздушного потока в утеплителе, минимальная температура на оконном откосе понизилась с $14,8^\circ\text{С}$ до $12,9^\circ\text{С}$. Поток теплоты через рассматриваемый участок конструкции увеличился по сравнению с предыдущим вариантом и составил: $Q_{\text{ф}} = 20,1 \text{ Вт/м}$. Приведенное сопротивление теплопередаче конструкции с учетом фильтрации составило: $R_0^{\text{пр.ф}} = 2,39 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С/Вт}$. Теплотери через конструкцию вследствие продольной фильтрации увеличились на 13%.

Таким образом, фильтрация воздуха отражается на теплозащитных свойствах стен с вентилируемым фасадом. Вместе с тем следует отметить, что описанные расчеты являются показательными. На их результаты существенно влияют: воздухопроницаемость теплоизоляционного материала; особенности рассматриваемой конструкции; закономерности распределения давления в вентилируемом зазоре; аэродинамические характеристики здания.

В зависимости от сочетания этих параметров результаты расчетов могут значительно варьироваться. Например, теплотери через однотипные фрагменты ограждающих конструкций в двух различных зданиях могут быть одинаковы, хотя применяемые утеплители



в этих фрагментах существенно отличаются воздухопроницаемостью. Или наоборот, при использовании одинаковой конструкции и материалов вентилируемого фасада теплотери двух зданий могут существенно отличаться в связи с различием их аэродинамических характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше результаты показывают возможность проведения оценочных расчетов влияния продольной фильтрации воздуха на теплозащиту стен с наружным расположением пористой теплоизоляции. При этом характеристики теплоизоляционных материалов, необходимые для проведения этих расчетов, определяются экспериментально, а аэродинамические характеристики конструкции фасада и здания — расчетным путем. Представляется, что такие оценки целесообразно проводить в следующих случаях: при обосновании необходимости установки в конструкции ветрозащитной мембраны; для сравнительной оценки теплозащиты используемых конструкций; при определении характеристик теплозащиты стен с вентилируемыми фасадами для высотных зданий и зданий в районах, характеризующихся большими скоростями ветра.

В. Г. ГАГАРИН, д. т. н., проф., зав. лаб.;
В. В. КОЗЛОВ, к. т. н., с. н. с.; А. В. САДЧИКОВ, м. н. с.
Лаборатория теплофизических характеристик и долговечности строительных материалов и конструкций НИИСФ РААСН

Литература

1. Ф. В. Ушков. Влияние воздухопроницаемости на теплозащиту стен // Строительная промышленность. № 8, 1951.
2. Р. Е. Брилинг. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. — М.: Госстройиздат, 1949.
3. К. Ф. Фокин. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. — М.: Стройиздат, 1973.
4. ГОСТ 25891-83 «Методы определения сопротивления воздухопроницанию ограждающих конструкций».