

## Фильтрация воздуха через ограждающие конструкции

*Аспирант Д.В. Петросова\**

*ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

**Ключевые слова:** воздухопроницаемость; фильтрация воздуха; ограждающие конструкции; скорость фильтрации; поперечная фильтрация; фильтрационный перенос тепла

В настоящее время происходит интенсивная смена строительных конструкций, поиск новых возможностей для повышения энергоэффективности зданий. Широкое применение получили ограждающие конструкции с использованием эффективных утеплителей с низкими коэффициентами теплопроводности, в том числе легкие ограждающие конструкции [1], позволяющие повысить тепловую защиту зданий. Новые ограждающие конструкции требуют всестороннего исследования, поскольку считавшиеся ранее малозначительными особенности конструкций часто начинают оказывать существенное влияние на их эксплуатационные свойства.

Несущим элементом такой ограждающей конструкции является легкий тонкостенный профиль, заполнение выполнено с применением эффективного утеплителя с невысокой плотностью. Снижение плотности утеплителя сопровождается повышением воздухопроницаемости. Для уменьшения воздухопроницаемости в конструкции используются ветрозащитные пленки. Однако влияние фильтрации воздуха на теплозащитные свойства таких конструкций ранее не рассматривалось.

Исследования, посвященные данному вопросу применительно к различным ограждающим конструкциям в нашей стране производились с конца XIX века. Основоположниками в данной области были гигиенисты в лаборатории Эрисмана. В основу научной разработки вопросов фильтрации воздуха был положен закон сопротивления при фильтрации жидкости, закон Дарси.

В 30-е годы изучением воздухопроницаемости строительных материалов и ограждающих конструкций занимались П.Я. Брянцев, Б.Ф. Васильев, С.И. Ветошкин, Д. Галанин, С.И. Идашкин, М.И. Субботкин, П.С. Философов. За рубежом данную тему в то же время в своих работах затронул E. Raisch [2]. Исследования различных аспектов воздухопроницаемости и фильтрации были выполнены Р. Е. Брилингом [3]. В частности, он экспериментально определил воздухопроницаемость большинства строительных материалов и конструкций стен, применявшихся в то время. Математическая модель одномерного теплопереноса в конструкции при поперечной фильтрации воздуха была предложена Ф. В. Ушковым [4]. Им же был разработан метод расчета распределения температуры по толщине конструкции при поперечной фильтрации воздуха.

Вопросы воздухопроницаемости и фильтрации воздуха исследовались также в работах В.П. Титова [5], Ю.А. Калядина [6,7], В.С. Беляева [8], М.Д. Артемова [9], Е.В. Веселовацкой [10], А.Д. Кривошеина [11]. Исследования влияния продольной фильтрации воздуха в ограждающих конструкциях на теплозащитные свойства проведены В.В. Гагариным, В.В. Козловым, А.В. Садчиковым [12,13]. В работе А.В. Садчикова была разработана методика учета влияния продольной фильтрации воздуха в утеплителе на теплозащитные свойства стен с навесными вентилируемыми фасадами [14]. В работе Петриченко М. Р., Петроченко М. В. [15] рассмотрена гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором. Солощенко С.С. [16] исследовал влияние вентилируемого зазора на теплофизические характеристики систем наружного утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки, но влияние воздухопроницаемости на конструкции остается не изученным.

Авторами работ по исследованию воздухопроницаемости оболочки зданий за рубежом являются Iain S. Walker, David J. Wilson, Max H. Sherman [17], Silberstein A., Hens H. [18], Mei H. T. [19] и др.

При использовании воздухопроницаемых ограждающих конструкций тепловой поток выносится, в том числе, и за счет фильтрации воздуха. Предлагается учитывать конвективный механизм переноса теплоты, соизмеримый с кондуктивным механизмом переноса теплоты.

Уравнение переноса теплоты имеет вид:

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \kappa \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$k$  – коэффициент фильтрации, м/с.

Воздухообмен осуществляется только за счет воздухопроницаемости ограждений, а теплопередача – за счет теплопроводности и конвекции. Воздух двигается по порам и капиллярам медленно (числа Рейнольдса много меньше 1), тогда средняя скорость воздуха сквозь ограждение будет вычисляться по формуле Дюпюи:

$$v = k \cdot I, \quad (2)$$

где  $I$  – градиент напора;

$v$  – скорость фильтрации, м/с.

Средняя скорость воздушного потока на фронте ограждающей конструкции определяется следующим образом:

$$v = \frac{Q}{A}, \quad (3)$$

где  $Q$  – расход воздуха в помещение (проходящий через стены, пол и потолок), м<sup>3</sup>/час;

$A$  – площадь стен, пола и потолка, м<sup>2</sup>.

Расход воздуха на воздухообмен не известен, но известен перепад давления, создаваемый вентилятором.

Перепад давления в гидравлике оценивается следующим образом:

$$\Delta p = \rho \frac{v^2}{2} \zeta, \quad (4)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления внутри и снаружи помещения, Па;

$\zeta$  – эффективный коэффициент сопротивления ограждения.

Эффективный коэффициент сопротивления зависит от числа Рейнольдса слоя. Эффективный коэффициент сопротивления либо известен, либо зависит от коэффициента фильтрации  $\zeta = \zeta(I)$ :

$$\zeta = \frac{(g\delta)^2}{k^2} \frac{2\rho}{\Delta P}. \quad (5)$$

Для определения коэффициента фильтрации  $k$  и эффективного коэффициента сопротивления ограждения  $\zeta$  необходимо знать значение расхода воздуха, проходящего через конструкцию, определить перепад давления на наружной и внутренней поверхностях и установить связь между перепадом давления и расходом воздуха.

Цель экспериментального исследования, описанного далее, – определение коэффициента фильтрации через ограждающую конструкцию.

### Описание эксперимента

Объектом натурных исследований являлся коттедж в Ленинградской области поселка Коробицино, построенный строительной организацией ООО «Авекс Плюс». Здание коттеджа двухэтажное с чердаком (рис. 1).

Для испытаний были выбраны два помещения на первом и втором этажах. На первом этаже рассматривалось помещение бытового назначения, расположенное в осях D-E и 1-2, на втором этаже – жилая комната в осях А-В и 2-3. Помещения, в которых проводились испытания ограждающих конструкций на воздухопроницаемость, выделены цветом на планах этажей (рис. 2, 3).



Рисунок 1. Коттедж, Ленинградская область, поселок Коробицино

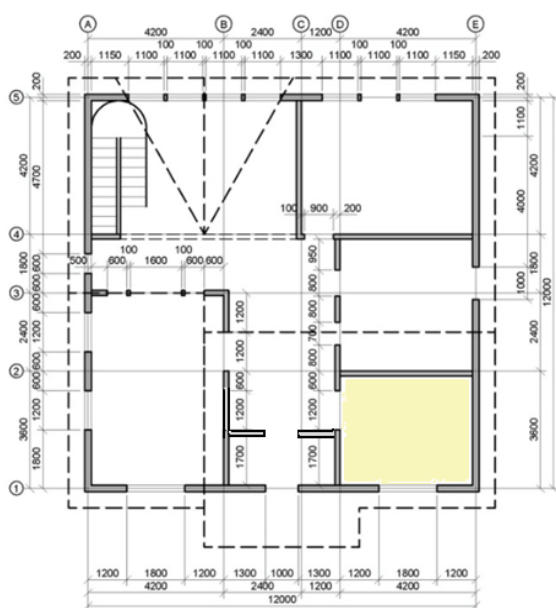


Рисунок 2. План первого этажа

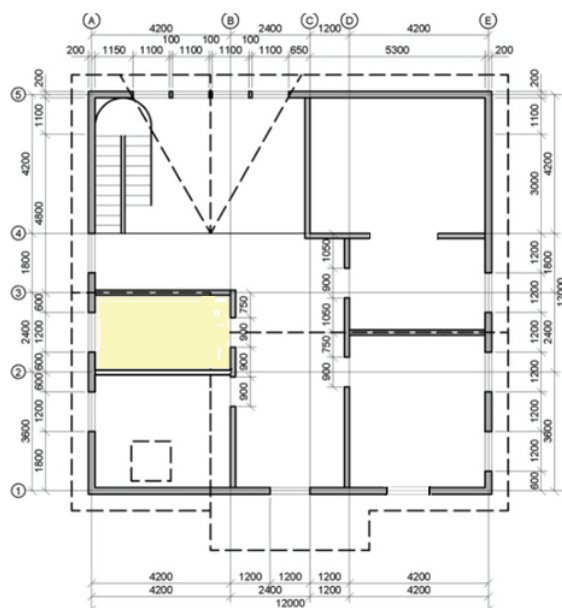


Рисунок 3. План второго этажа

Геометрические характеристики помещений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические характеристики помещений

№ п/п	Наименование помещения	Площадь помещения, м <sup>2</sup>	Объем помещения, м <sup>3</sup>	Площадь наружных ограждений, м <sup>2</sup>
1	Помещение первого этажа	12,60	34,02	21,6
2	Помещение второго этажа	10,08	29,16	7,2

Толщина ограждающей конструкции  $\delta_2 = 300$  мм (рис. 4). Проектное сопротивление теплопередаче наружных стен коттеджа  $R_0 = 4,6$  (м<sup>2</sup>°C)/Вт. Несущим элементом ограждающей конструкции является легкий тонкостенный профиль с просечками, выполненными в шахматном порядке, – так называемый термопрофиль 1. К нему саморезами крепится горизонтальная обрешетка 3. С наружной стороны к обрешетке 3 таким же образом крепится вертикальная обрешетка 4, к которой, в свою очередь, крепится вагонка 5. Внутри термопрофилей укладывается утеплитель 2. Термопрофили расположены с шагом 600 мм. Толщина утеплителя составляет  $\delta_1 = 200$  мм. В качестве утеплителя применен плитный карбамидный пенопласт с теплопроводностью  $\lambda = 0,045$  Вт/(м °C). Высота стенки термопрофиля коттеджа  $\delta_1 = 200$  мм обусловлена конструктивными расчетами. Высота термопрофиля совпадает с толщиной утеплителя. С внутренней стороны к обрешетке 3 саморезами крепятся стекломагнезит и гипсокартонные листы 6.

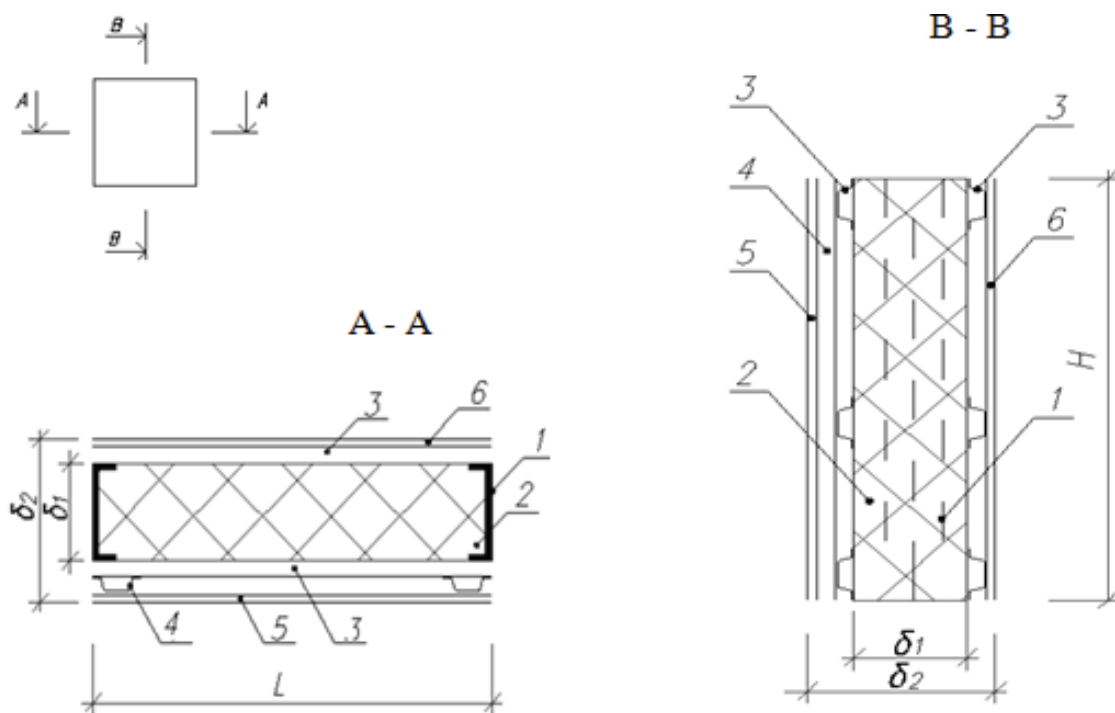


Рисунок 4. Ограждающая конструкция:

1 – термопрофиль; 2 – утеплитель (150 мм); 3 – горизонтальная обрешетка;  
4 – вертикальная обрешетка; 5 – вагонка; 6 – два листа ГКЛ (2x12,5 мм);

L – длина, мм; H – высота, мм;  $\delta_1$  – толщина утеплителя, мм;  $\delta_2$  – толщина конструкции, мм.

Заполнение оконных проемов выполнено однокамерными стеклопакетами. В здании предусмотрена естественная вентиляция. Система отопления горизонтальная двухтрубная, от отопительного котла. Полы коттеджа утепленные.

Испытания проведены в натуральных условиях в соответствии с ГОСТ 31167-2003 «Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях». Для выполнения работ по определению воздухопроницаемости ограждающих конструкций здания и объемов фильтрации использованы следующие контрольно-измерительные приборы и оборудование: испытательный стенд для определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций зданий «MinneapolisBlowerDoor», термогигрометр CENTER 314, анемометр Meterman TMA10, рулетка измерительная металлическая STAYER, персональный компьютер RoverBookNautilus E400 WH. Испытания проведены 30 ноября 2010 г. В указанный период температура воздуха в помещениях коттеджа составляла 24°C, температура наружного воздуха составляла минус 7°C, скорость ветра – 1,5 м/с. На период испытаний в помещении были герметизированы вытяжные каналы вентиляции и технологические отверстия в стенах и перекрытиях. С помощью тепловизора ThermoCAM P60 зав. № 23400825 была проведена тепловизионная съемка, которая позволила установить, что щели отсутствуют, а воздушный поток фильтруется через стены.

### Обработка эксперимента

Посредством вентилятора в помещении с площадью наружных стен  $A=21,6 \text{ м}^2$  и  $7,2 \text{ м}^2$  создавался перепад давления между помещением и наружной средой. При помощи регулировки расхода воздуха  $Q = \text{var}$  создавалось ступенчатое изменение давления  $\Delta P = \text{var}$ . При фиксированном перепаде давления между испытываемым объемом и наружной средой измерялся расход воздуха через вентилятор.

Результаты испытаний, полученные при разности давлений наружного и внутреннего воздуха 50 Па, приведены в таблице 2. Графики с экспериментальными данными и их аппроксимацией показаны на рисунках 5 – 6.

Таблица 2. Воздухообмен при разности давлений наружного и внутреннего воздуха 50 Па

	Объемный расход воздуха при разности давлений DP = 50 Па		Кратность воздухообмена при разности давлений DP = 50 Па, n50		Требование норматива СНиП 23-02-2003, п50, не более
	м³/час	погрешность	час-1	погрешность	час-1
<b>Помещение первого этажа</b>					
Понижение давления	68	+/- 7 %	2,0	+/- 9 %	≤ 2
Повышение давления	63	+/- 7 %	1,9	+/- 9 %	
Среднее		68	+/- 7 %	2,0	
<b>Помещение второго этажа</b>					
Понижение давления	59	+/- 7 %	2,0	+/- 9 %	≤ 2
Повышение давления	56	+/- 7 %	1,9	+/- 9 %	
Среднее		58	+/- 7 %	2,0	

Средняя воздухопроницаемость ограждающих конструкций при закрытых вентиляционных каналах в испытанных помещениях здания и разности давлений внутреннего и наружного воздуха 50 Па обеспечивает воздухообмен кратностью:

$$n_{50} = 1,95 \pm 0,18 \text{ ч}^{-1}.$$

Воздухопроницаемость конструкций и кратность воздухообмена в испытанных помещениях соответствует нормативным требованиям.

Условия обработки эксперимента:

- 1) живое сечение – это стены, пол и потолок за вычетом окон, через которые фильтрация не происходит;
- 2) скорость – это плотность расхода на поверхность A, м<sup>2</sup>;
- 3) поскольку в расчете применяется средняя скорость, за основу принята гидравлическая модель фильтрации Дюпюи;
- 4) все вытяжные отверстия герметично закрыты, окна идеально плотные, щели отсутствуют.

Для перепада давления воздуха внутри и снаружи помещения 50 Па расход воздуха равен 56 м<sup>3</sup>/ч, площадь живого сечения A = 58,32 м<sup>2</sup> (помещение второго этажа); расход воздуха 62 м<sup>3</sup>/ч и площадь живого сечения A = 75,24 м<sup>2</sup> (помещение первого этажа).

Тогда скорость фильтрации воздуха равняется:

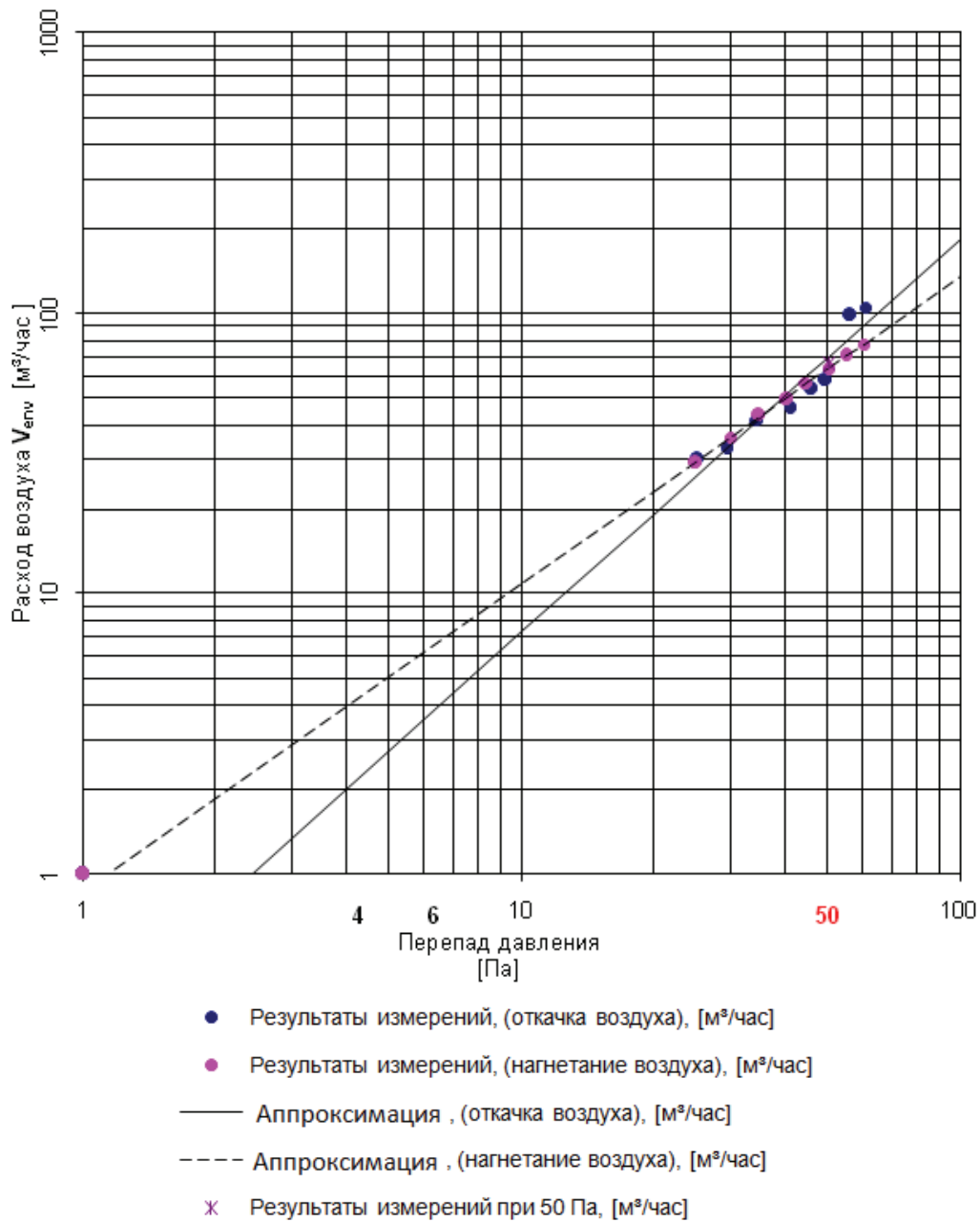
$$v = 0,27 \cdot 10^{-3} \frac{M}{c} \text{ для помещения второго этажа;}$$

$$v = 0,23 \cdot 10^{-3} \frac{M}{c} \text{ для помещения первого этажа.}$$

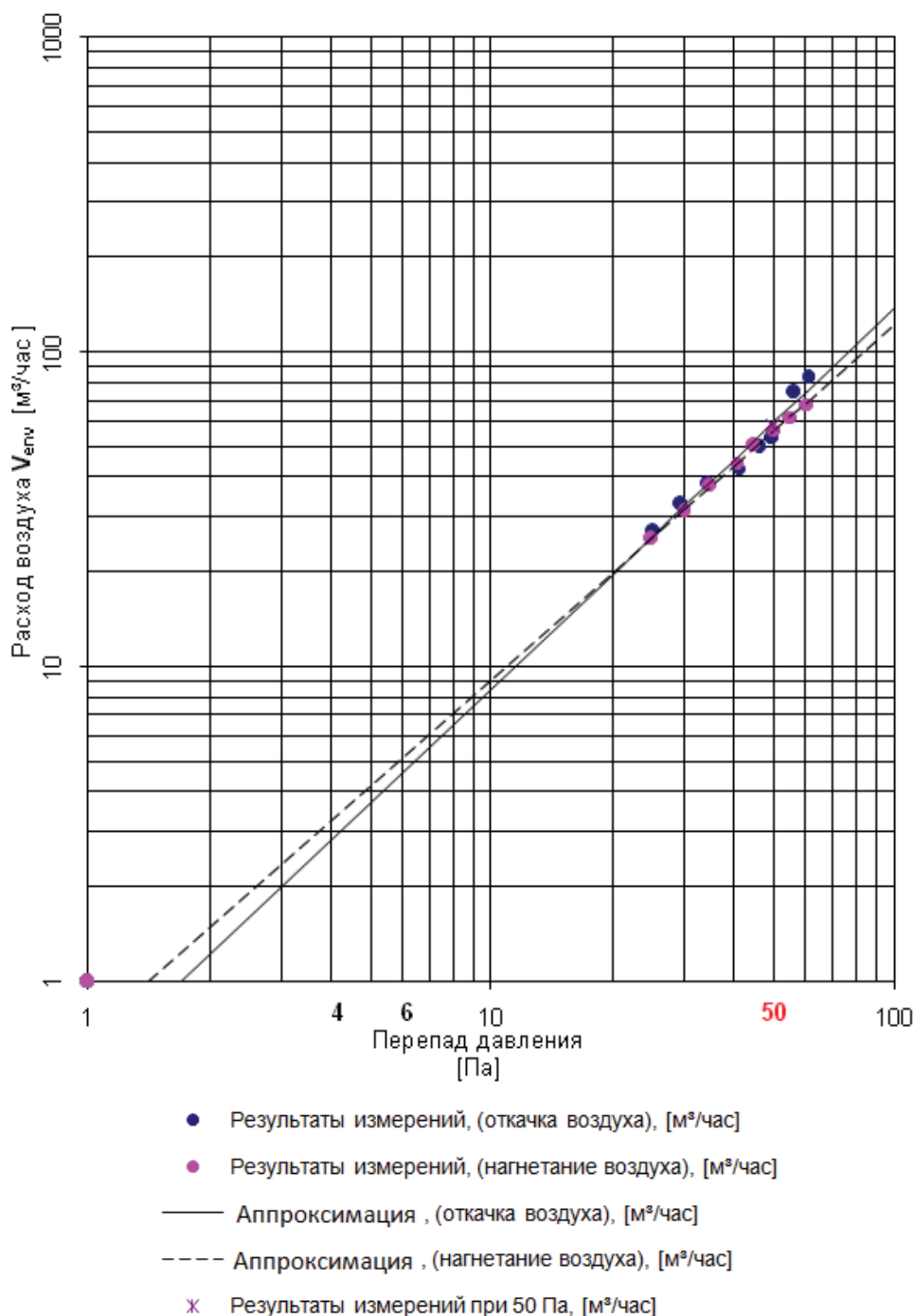
Коэффициент фильтрации воздуха равняется:

$$k = 1,9 \cdot 10^{-5} \frac{M}{c} \text{ для помещения второго этажа;}$$

$$k = 1,6 \cdot 10^{-5} \frac{M}{c} \text{ для помещения первого этажа.}$$



**Рисунок 5. График зависимости объемного расхода воздуха через ограждающую конструкцию от разности давлений между испытываемым объемом и наружной стеной. Помещение первого этажа**



**Рисунок 6. График зависимости объемного расхода воздуха через ограждающую конструкцию от разности давлений между испытываемым объемом и наружной стеной. Помещение второго этажа**

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Установлено подобие, которое позволяет, используя экспериментально определенный коэффициент фильтрации для одной конструкции, математически вычислить его для другой конструкции.
2. Получено эмпирическое выражение для коэффициента фильтрации  $\lg_{10} \zeta \cdot \lg_{10} (k \cdot 100000) = 2,3$ , связывающее коэффициент потерь напора и коэффициент фильтрации.
3. Получено значение коэффициента фильтрации воздушного потока через легкую ограждающую конструкцию  $k = 1,8 \cdot 10^{-5} \frac{M}{c}$ .

## Литература

1. Кузьменко Д. В., Ватин Н. И. Ограждающая конструкция «нулевой толщины» – термопанель // Инженерно-строительный журнал. 2008. №1. С. 13-21.
2. Raisch E. Die Luftdurchlässigkeit von baustoffen. Gesundheits-Ingenieur. 1928. №30. Pp. 481-489.
3. Брилинг Р. Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. М.: Стройиздат, 1948. 90 с.
4. Ушков Ф. В. Влияние воздухопроницаемости на теплозащиту стен // Строительная промышленность. 1951. №8. С. 16-19.
5. Титов В. П. Теплотехнический расчет наружных стен с учетом инфильтрации воздуха // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1962. №3. С. 137-147.
6. Калядин Ю. А. Исследование влияния внутренней фильтрации воздуха на температурный режим наружных стеновых панелей, утепленных воздухопроницаемыми материалами: Автореферат дис. канд. техн. наук. М.: 1966. 20 с.
7. Калядин Ю. А. Методы учета влияния внутренней фильтрации воздуха на теплотехнические свойства наружных стен, утепленных воздухопроницаемыми материалами // Сб. науч. тр. / НИИМОССТРОЙ. Вып. 3. 1966. С. 147-155.
8. Беляев В. С. Теплопередача в наружных стенах при продольной фильтрации воздуха // Теплотехнические свойства и микроклимат жилых зданий: Сб. науч. тр. / ЦНИИЭП жилища. М.: 1982. С. 18-22.
9. Артемов М. Д. К вопросу воздухопроницаемости ограждающих конструкций // Тепловой режим. Теплоизоляция и долговечность зданий: Сб. науч. тр. / НИИСФ. М.: 1981. С. 51-55.
10. Веселовацкая Е. В. Особенности теплопередачи через воздухопроницаемую теплоизоляцию трехслойных ограждающих конструкций: Дис. канд. техн. наук. М.: 1985. 223 с.
11. Кривошеин А. Д. Производственные сельскохозяйственные здания с воздухопроницаемыми ограждающими конструкциями: Дис. канд. техн. наук. Омск: 1993. 200 с.
12. Гагарин В. Г., Козлов В. В., Садчиков А. В. Учет продольной фильтрации воздуха при оценке теплозащиты стены с вентилируемым фасадом // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 6. С. 42-45.
13. Гагарин В. Г., Козлов В. В., Садчиков А. В., Мехнецов И. А. Продольная фильтрация воздуха в современных ограждающих конструкциях // АВОК. 2005. №8. С. 60-70.
14. Садчиков А. В. Влияние продольной фильтрации воздуха в утеплителе на теплозащитные свойства стен с навесными вентилируемыми фасадами. Дисс. канд. техн. наук. М.: 2007. 248 с.
15. Петриченко М. Р., Петровиченко М. В. Гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 51-56.
16. Солощенко С. С. Влияние вентилируемого зазора на теплофизические характеристики систем наружного утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 39-41.
17. Walker Iain S., Wilson David J., Sherman Max H. A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations // Original Research Article Energy and Buildings. 1998. Vol. 27. Is. 3. Pp. 293-299.
18. Silberstein A, Hens H. Effects of air and moisture flows on the thermal performance of insulations in ventilated roofs and walls // Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes. 1996. Vol.19. Pp. 367-385.
19. Mei H. T. Ventilated wall and window test passive-solar concept. Technical Report / Lamar Univ. Dept. of Mechanical Engineering. Beaumont, TX (USA): 1982. 44p.

*\*Дарья Владимировна Петросова, Санкт-Петербург, Россия  
Тел. моб.: +7(905)211-44-17; эл. почта: d\_kuzmenko@list.ru*



doi: 10.5862/MCE.28.4

## Air filtering through the building envelope

**D. V. Petrosova***Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia  
+7(905)211-44-17; e-mail: d\_kuzmenko@list.ru*

### Key words

air permeability; air filtering; building envelope; filtration rate; cross filtering; filtering heat transfer

### Abstract

Recently, building envelopes with efficient insulation of low thermal conductivity, including light building envelope, which allow to increase thermal protection of buildings, are widely used. This new building envelope require a comprehensive study, because previously considered unimportant features often start to make significant effect on the performance characteristics of structures.

To reduce the air permeability in the constructions wind-proof membranes are used. However, the influence of air filtering in such structures has not been researched yet.

When the air-permeable building envelopes are used, the heat flow is moved away also due to the air filtering. It is proposed to take into account the convective heat transfer mechanism commensurate with the conductive heat transfer mechanism. In the formula for determining the heat flow due to the air filtering the filtration coefficient of air through the building envelope is used. This coefficient is found experimentally for light building envelopes.

Furthermore, the empirical expression for the filtration coefficient, which relates it and the coefficient of heat loss is found.

### References

1. Kuzmenko D. V., Vatin N. I. *Magazine of civil engineering*. 2008. No. 1. Pp. 13-21. (rus)
2. Raisch E. *Die Luftdurchlässigkeit von baustoffen. Gesundheits-Ingenieur*. 1928. No. 30. Pp. 481-489.
3. Briling R. Ye. *Vozdukhopronitsayemost ograzhdayushchikh konstruktsiy i materialov* [Breathability of building envelopes and materials]. Moscow: Stroyizdat, 1948. 90 p. (rus)
4. Ushkov F. V. *Stroitel'naya promyshlennost* [Building industry]. 1951. No. 8. Pp. 16-19. (rus)
5. Titov V. P. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura* [Universities news. Building and architecture]. 1962. No. 3. Pp. 137-147. (rus)
6. Kalyadin Yu. A. *Issledovaniye vliyaniya vnutrenney filtratsii vozdukha na temperaturnyy rezhim naruzhnykh stenovykh paneley, uteplennykh vozdukhopronitsayemymi materialami* [Investigation of the effect of internal air filtration on the temperature conditions external wall panels, insulated by breathable materials:]. Candidate of Technical Science thesis abstract. Moscow: 1966. 20 p. (rus)
7. Kalyadin Yu. A. *Sb. nauch. tr.* [Collection of proceedings]. NIIMOSSTROY. Is. 3. Moscow: 1966. Pp. 147-155. (rus)
8. Belyayev B. C. *Sb. nauch. tr.* [Collection of proceedings]. TsNIIEPzhilishcha. Moscow: 1982. Pp. 18-22. (rus)
9. Artemov M. D. *Sb. nauch. tr.* [Collection of proceedings]. NIISF. Moscow: 1981. Pp. 51-55. (rus)
10. Veselovatskaya Ye. V. *Osobennosti teploperedachi cherez vozdukhopronitsayemuyu teploizolyatsiyu trekhsloynnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy* [Features of heat transfer through breathable three-layer insulation walling]. Candidate of Technical Sciencethesis abstract. Moscow: 1985. 223 p. (rus)
11. Krivoshein A. D. *Proizvodstvennyye selskokhozyaystvennyye zdaniya s vozdukhopronitsayemymi ograzhdayushchimi konstruktsiyami* [Industrial agricultural buildings with breathable protecting designs]. Candidate of Technical Sciencethesis abstract. Omsk: 1993. 200 p. (rus)
12. Gagarin V. G., Kozlov V. V., Sadchikov A. V. *Promyshlennoye i grazhdanskoyestroitelstvo* [Industrial and civil engineering]. 2005. No. 6. Pp. 42- 45. (rus)
13. Gagarin V. G., Kozlov V. V., Sadchikov A. V., Mekhnetsov I. A. *AVOK*. 2005. No. 8. Pp. 60-70. (rus)

14. Sadchikov A. V. *Vliyaniye prodolnoy filtratsii vozdukha v uteplitele na teplozashchitnyyesvoystva sten s navesnymi ventiliruyemyimi fasadami* [The influence of the longitudinal air filtration in the insulation on the heat-shielding properties of the walls with hinged ventilated facades]. Candidate of Technical Science thesis abstract. Moscow: 2007. 248 p. (rus)
15. Petrichenko M. R., Petrochenko M.V. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 8(26). Pp. 51-56. (rus)
16. Soloshchenko S. S. *Magazine of civil engineering*. 2011. No. 2(20). Pp. 39-41. (rus)
17. Walker Iain S., Wilson David J., Sherman Max H. A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations. *Original Research Article Energy and Buildings*. 1998. Vol. 27, Is. 3. Pp. 293-299.
18. Silberstein A., Hens H. Effects of air and moisture flows on the thermal performance of insulations in ventilated roofs and walls. *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*. 1996. Vol. 19. Pp. 367-385.
19. Mei H. T. *Ventilated wall and window test passive-solar concept. Technical Report*. Lamar Univ. Dept. of Mechanical Engineering. Beaumont, TX (USA): 1982. 44 p.

**Full text of this article in Russian: pp. 24-31.**