

УДК 699.86

**Р. А. ДАВЫДОВ, С. И. МОНАХ**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕПЛОЗАЩИТЫ СТЕНЫ ЗДАНИЯ С ВЕНТИЛИРУЕМЫМ  
ФАСАДОМ С УЧЕТОМ ПРОДОЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА**

**Аннотация.** Работа посвящена актуальной задаче расчета температурного поля в утеплителе вентилируемых фасадов. На основе анализа математической модели двумерного стационарного температурного поля предложен метод расчета, позволяющий проводить оценку теплозащитных свойств конструкций с учетом фильтрации наружного воздуха. По результатам проведенных расчетно-аналитических исследований рекомендовано при проектировании вентилируемых фасадов ввести ограничения по значению минимального расчетного сопротивления теплопередаче конструкции с учетом фильтрации воздуха в слое теплоизоляции межоконного простенка.

**Ключевые слова:** теплозащита, воздухопроницаемость, температурное поле, коэффициент воздухопроницаемости, энергосбережение, теплопроводность, теплоемкость, продольная фильтрация.

**ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Учет продольной фильтрации воздуха принципиально не сводится к одномерной задаче и поэтому представляет вычислительные трудности. Сравнительно небольшая проработка данной темы, по-видимому, была вызвана незначительной актуальностью проблемы в недалеком прошлом и большими вычислительными затратами для ее разрешения. В последнее десятилетие произошли изменения, заставляющие вернуться к исследованию этой проблемы на новом уровне.

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

В статье проанализированы работы В. Г. Гагарина и В. В. Козлова по расчету теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором. Предложены новые методики расчетов и определения теплопереноса в утеплителе.

**ЦЕЛИ**

Разработка методики расчета температурных полей в наружных стенах с вентилируемыми фасадами с учетом продольной фильтрации воздуха и методики расчета температурных режимов помещения с учетом процессов теплопереноса внутри ограждений.

**ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

Влияние фильтрации воздуха через ограждающие конструкции на их теплозащитные свойства исследовалось с конца XIX века. Первые исследования были проведены гигиенистами в лаборатории Эрисмана. Многосторонние исследования различных аспектов воздухопроницаемости и фильтрации были выполнены Р. Е. Брилингом [1]. В частности он экспериментально определил воздухопроницаемость большинства строительных материалов и конструкций стен, применяемых в то время. Математическая модель одномерного теплопереноса в конструкции при поперечной фильтрации воздуха была предложена Ф. В. Ушковым [2]. Им был разработан метод расчета распределения температуры по толщине конструкции при поперечной фильтрации воздуха. В дальнейшем были работы Ю. А. Калядина, В. С. Беляева, Е. В. Веселовацкой и др., посвященные исследованию конвективного движения воздуха и связанного с ним теплопереноса в конструкциях.

© Р. А. Давыдов, С. И. Монах, 2017

Во-первых, резкое повышение нормативных требований к сопротивлению теплопередаче стен в корне изменило их конструктивные решения. Практически невозможно спроектировать наружную ограждающую конструкцию без использования эффективных теплоизоляционных материалов.

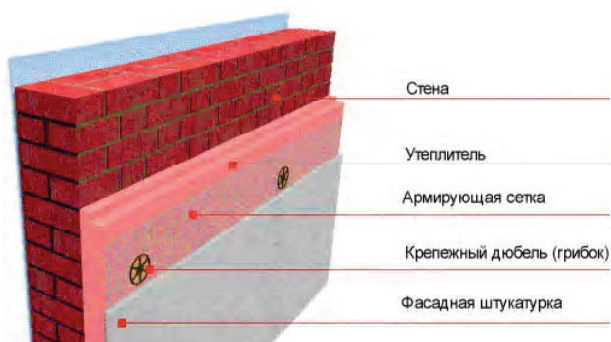


Рисунок – Схема навесного теплоизоляционного фасада.

весьма малой плотностью, применение которых экономически выгодно. Чем меньше плотность теплоизоляционного материала, тем выше его воздухопроницаемость, хотя точной зависимости одного параметра от другого в настоящее время не установлено.

Несмотря на сложность точного расчета вентиляционного потока нагреваемого в строительной конструкции воздуха, это направление экономии топливно-энергетических ресурсов в современном строительстве является весьма перспективным. Поэтому необходим инженерный метод расчета температурного поля с учетом фильтрации воздуха в ограждающей конструкции.

Как уже отмечалось, перенос теплоты через конструкцию при учете продольной фильтрации воздуха принципиально не сводится к одномерной задаче, поэтому он может рассчитываться практически только численными методами. Характеристики теплозащиты конструкции в этом случае могут быть получены путем расчета температурного поля, причем решаемое уравнение должно учитывать перенос теплоты фильтрацией воздуха.

Уравнение теплопроводности, учитывающее перенос теплоты фильтрацией воздуха, в общем случае имеет вид [3]:

$$c_M \gamma_0 \frac{\partial t}{\partial z} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad} T} - c_B \cdot \overrightarrow{G_C T}), \quad (1)$$

где  $T$  – температура, К;

$\lambda$  – расчетный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);

$c_B$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С) ( $c_B = 1\,006$  Дж/(кг·°С));

$c_M$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С);

$G_C$  – плотность потока воздуха через конструкцию, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$\gamma_0$  – плотность материала в сухом состоянии, кг/м<sup>3</sup>;

$z$  – время, с.

Уравнение (1) является уравнением теплопроводности с добавкой, стоящей в скобках в правой части, представляющей собой плотность потока теплоты, переносимой перемещающимся воздухом. Выражение для этого потока легко может быть получено из общих соображений. Переносимая воздухом плотность потока теплоты равна теплоемкости воздуха, умноженной на его температуру и на плотность потока воздуха [4].

В рассматриваемой постановке задачи плотность потока воздуха через конструкцию принимается величиной, постоянной по координатам и по времени (стационарной). В этом случае через одну из границ участка конструкции поток воздуха входит в теплоизоляционный слой, а через другую – выходит. Воздух перемещается вдоль фасада, внутри воздушного зазора и в утеплителе под действием градиентов давления, которые возникают при воздействии ветрового напора. Количественное определение этих градиентов давления воздуха является задачей аэродинамики здания. По своей величине скорости движения воздуха, вызванные ветровым напором вдоль фасада здания, в воздушном зазоре и в утеплителе отличаются на порядки [5].

Так, если для движения воздуха вдоль фасада характерны скорости в несколько метров в секунду, то для соответствующего движения воздуха в воздушном зазоре – в несколько сантиметров в секунду, а для движения воздуха в утеплителе – в несколько сантиметров в минуту ( $Re < 5$ ). Поэтому при рассмотрении проблем внешней аэродинамики здания чаще всего не учитывается движение воздуха в воздушном зазоре, а при рассмотрении проблем движения воздуха в воздушном зазоре не учитывается движение воздуха в утеплителе.

Но даже сравнительно небольшое движение воздуха в утеплителе способно переносить количество теплоты, сопоставимое с тепловыми потерями конструкции без фильтрации [6].

Следует отметить, что межоконные простенки подвержены наибольшему влиянию продольной фильтрации воздуха в утеплителе не потому, что при равных условиях воздух в утеплителе для этого узла движется интенсивнее (очевидно, что интенсивность движения воздуха зависит только от градиента давления и будет везде примерно одинакова), а потому, что чем короче путь воздуха в утеплителе, тем меньше он успевает прогреваться и интенсивнее отводит теплоту из конструкции [7].

Для определенности рассматривается фильтрация воздуха вдоль стены в направлении, перпендикулярном боковому оконному откосу (рис.).

Это наиболее простой и характерный случай, позволяющий проиллюстрировать особенности исследуемого процесса. Задача сводится к двумерной, а уравнение теплопроводности в стационарном процессе принимает вид [3]:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} - c_B \cdot G_c \cdot \frac{\partial t}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где  $x, y$  – координаты, м;

$t$  – температура, °С;

$\lambda_x, \lambda_y$  – расчетные коэффициенты теплопроводности по соответствующим направлениям, Вт/(м·°С);

$G_c$  – поток воздуха через конструкцию, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $G_c > 0$ , если воздух движется в положительном направлении оси  $y$ ,  $G_c < 0$  – если в отрицательном.

Введенная величина  $G_c$  отличается от общепринятой воздухопроницаемости  $G$  размерностью (представляет количество воздуха в секунду, а не в час). Эти величины связаны соотношением:  $G = 3600 \cdot G_c$ .

Поток воздуха через конструкцию  $G_c$ , входящий в уравнение (2), определяется формулой, полученной на основе опубликованных исследований [3]:

$$G_c = \frac{\Delta P}{3600 \cdot \left( 2R_{u.эм} + \frac{L}{i} \right)} = \frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{1}{3600 \cdot \left( \frac{2R_{u.эм}}{L} + \frac{1}{i} \right)}, \quad (3)$$

где  $L$  – длина участка конструкции, по которому движется воздух, м;

$\Delta P$  – разность давлений на участке конструкции, вызывающая фильтрацию воздуха, Па;

$\Delta P/L$  – градиент давления воздуха в теплоизоляционном слое конструкции, Па/м;

$i$  – коэффициент воздухопроницаемости теплоизоляционного материала, кг/(м·ч·Па);

$R_{u.эм}$  – сопротивление воздухопроницанию ветрогидрозащитной мембраны, (м<sup>2</sup>·ч·Па)/кг;

$1/3600$  – размерный коэффициент, связанный с переходом от часов в коэффициенте воздухопроницаемости к секундам в потоке воздуха.

Величины  $\Delta P, i, L$  являются параметрами, необходимыми для расчета значения  $G_c$ . Градиент давления воздуха вдоль фасада здания,  $\Delta P/L$ , зависит как от геометрии здания, так и от параметров ветрового режима. Эта величина существенно изменяется во времени, а для проведения расчетов требуется только ее среднее значение.

Корректное определение этой величины для проведения инженерных расчетов требует специальных исследований в каждом конкретном случае.

Коэффициент воздухопроницаемости некоторых строительных и теплоизоляционных материалов приведен в нормативной литературе [4]. Коэффициент воздухопроницаемости большинства современных теплоизоляционных материалов и сопротивление воздухопроницанию ветрогидрозащитной мембраны определяются экспериментально. Для назначения их расчетных значений также требуются специальные исследования.

## ВЫВОДЫ

В работе разработана актуальная научно-практическая задача формирования теплового, воздушного и влажностного режима помещений зданий с учетом требований экономии энергоресурсов. Проанализирован и обоснован метод расчета температурного поля с учетом фильтрации воздуха ограждающей конструкции, а также метод определения воздухопроницаемости и сопротивления воздухопроницанию.

Разработанный метод расчета позволяет проводить оценку теплозащитных свойств конструкций с учетом фильтрации наружного воздуха. Вариант метода, изложенный в статье, предусматривает расчет наихудшей, с точки зрения теплопотерь, конструкции здания. Для систематического использования представленного метода расчета необходимо составить банк данных по коэффициентам воздухопроницаемости волокнистых теплоизоляционных материалов, используемых в вентилируемых фасадах, и разработать метод расчета перепадов давления на фасаде здания при ветре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика [Текст] / В. Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1982. – 415 с.
2. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий [Текст] / К. Ф. Фокин. – М. : Стройиздат, 1973. – 348 с.
3. Гагарин, В. Г. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором [Текст] / В. Г. Гагарин, В. В. Козлов, Е. Ю. Цыкановский // АВОК. – 2004. – № 2. – С. 20–26.
4. ДБН В 2.6-31:2006. Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель [Текст]. – На заміну СНиП II-3-79; чинні від 2007-04-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2006. – 72 с. – (Національний стандарт України).
5. Методические указания по проектированию новых типов наружных ограждающих конструкций с высокими теплозащитными показателями [Текст] / Г. К. Авдеев, Ю. А. Матросов, И. Н. Бутовский [и др.]. – М. : МНИИТЭП, 1995. – 284 с.
6. Артыкпаев, Е. Т. Экспериментальные исследования стыков наружных стен домов серии П44/17 с теплоизоляцией из фенольно-резольного пенопласта [Текст] / Е. Т. Артыкпаев, И. А. Румянцева, Е. Ф. Файфман // Тепловая эффективность наружных ограждающих конструкций : Сб. науч. ст. / Моск. н.-и. и проект. ин-т типового и эксперим. проектирования; Под ред. Г. К. Авдеева. – М. : Гл. архит.-планировоч. упр., 1988. – С. 47–53.
7. ВСН 43-96. Ведомственные строительные нормы по теплотехническим обследованиям наружных ограждающих конструкций с применением малогабаритных тепловизоров [Текст]. – Вводятся впервые ; введ. 1996-10-01. – М. : Мосоргстрой, 1996. – 20 с.

Получено 11.10.2017

### Р. О. ДАВИДОВ, С. І. МОНАХ МЕТОД ОЦІНКИ ТЕПЛОЗАХИСТУ СТІНИ БУДИНКУ З ВЕНТИЛЬОВАНИХ ФАСАДІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ ПОВЗДОВЖНІХ ФІЛЬТРАЦІЇ ПОВІТРЯ ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Робота присвячена актуальній задачі розрахунку температурного поля в утеплювачі вентильованих фасадів. На основі аналізу математичної моделі двовимірного стаціонарного температурного поля запропоновано метод розрахунку, що дозволяє проводити оцінку теплозахисних властивостей конструкцій з урахуванням фільтрації зовнішнього повітря. За результатами проведених розрахунково-аналітичних досліджень рекомендовано при проектуванні вентильованих фасадів ввести обмеження за значенням мінімального розрахункового опору теплопередачі конструкції з урахуванням фільтрації повітря в шарі теплоізоляції міжвіконний простінок.

**Ключові слова:** теплозахист, повітропроникність, температурне поле, коефіцієнт повітропроникності, енергозбереження, теплопровідність, теплоємність, поздовжня фільтрація.

ROMAN DAVYDOV, SVETLANA MONAKH  
METHOD OF ESTIMATION OF THE THERMAL PROTECTION OF THE WALL  
OF A BUILDING WITH VENTILATED FACADES, TAKING INTO ACCOUNT  
LONGITUDINAL AIR FILTRATION

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The work is devoted to the actual task of calculating the temperature field in the heater of ventilated facades. On the basis of the analysis of the mathematical model of the two-dimensional stationary temperature field, a method of calculation is proposed, which allows evaluating the heat-protective properties of constructions, taking into account external air filtration. According to the results of calculations and analytical studies, it is recommended to introduce restrictions on the design value of the ventilated facades with respect to the value of the minimum design resistance of the heat transfer of the structure, taking into account the air filtration in the layer of thermal insulation of the inter-window sill.

**Key words:** thermal protection, air permeability, temperature field, coefficient of air permeability, energy saving, thermal conductivity, heat capacity, longitudinal filtration.

**Давыдов Роман Александрович** – бакалавр; магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: теплофизика, энергосбережение, развитие общей методики и анализа теплосбережения.

**Монах Светлана Игоревна** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в коммунальной энергетике. Повышение эффективности теплотехнического оборудования.

**Давидов Роман Олександрович** – бакалавр; магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: теплофізика, енергозбереження, розробка загальної методики та аналізу теплозберігання.

**Монах Світлана Ігорівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в комунальній енергетиці. Підвищення ефективності теплотехнічного обладнання.

**Davydov Roman** – bachelor; master's degree student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: thermophysics, energy conservation, development of general methodology and analysis of heat conservation.

**Monakh Svetlana** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy saving in municipal power engineering. Increasing the efficiency of heat engineering equipment.