

На правах рукописи

Петросова Дарья Владимировна

**Неизотермическая фильтрация воздуха через ограждающие
конструкции замкнутых помещений**

**Специальность 05.23.16 –
гидравлика и инженерная гидрология**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
Михаил Романович Петриченко

Официальные оппоненты – Позин Гари Моисеевич доктор
технических наук, профессор кафедры
«Безопасность жизнедеятельности»
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный университет
технологии и дизайна»;

Крупкин Григорий Яковлевич кандидат
технических наук, старший научный
сотрудник, руководитель лаборатории
промышленной вентиляции ФГУН
«СЗНЦ гигиены и общественного
здоровья»

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-
строительный университет»

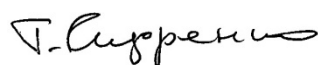
Защита состоится «20» декабря 2012 г. в часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д. 29, Гидрокорпус-2, аудитория 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « .. » 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета
доктор технических наук

 Сидоренко Геннадий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Влияние фильтрации воздуха на температурный и влажностный режим строительных конструкций значительно. Этим объясняется то большое внимание, которое уделяется вопросам фильтрации воздуха через строительные конструкции.

В настоящее время при строительстве жилых зданий в качестве наружных ограждений применяются многослойные ограждающие конструкции с утеплителем. Примером таких конструкций является легкая ограждающая конструкция. Каркас легкой ограждающей конструкции выполнен из термопрофилей, которые обрамляют эффективный утеплитель. Термопрофиль – это легкий стальной тонкостенный профиль с просечками, выполненными в шахматном порядке.

Имеются предложения и первоначальный опыт применения легких стальных ограждающих конструкций с эффективным утеплителем в малоэтажных жилых зданиях, но без достаточного теоретического и экспериментального обоснования.

Недостаточно исследован вопрос о механизме фильтрации воздуха через ограждающие конструкции. Возможно ли, для расчета ограждающей конструкции применять гидравлическую теорию фильтрации? Недостаточно изучен вопрос о переносе консервативной примеси (температуры) при фильтрации воздуха через ограждающую конструкцию. Какова доля переносимой теплоты в общем потоке теплоты? Каковы коэффициенты фильтрации в конкретной ограждающей конструкции?

Перечисленные задачи фильтрации воздуха недостаточно освещены в технической и нормативной литературе.

Эти задачи актуальны для развития энергосберегающего строительства, в том числе для определения воздухопроницаемости ограждений и для помещений с ограниченной кратностью воздухообмена (складские, производственные помещения).

Имеются значения и методики определения коэффициента фильтрации материала. Интерес представляет коэффициент фильтрации конструкции.

Цель работы - гидравлическая методика определения фильтрационного переноса температуры и теплоты через ограждающую конструкцию замкнутого

помещения. Поставленная цель может быть достигнута использованием методов прикладной механики жидкости и газов (гидравлики).

В соответствии с поставленной задачей исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ исследований, посвященных влиянию фильтрации воздуха на перенос консервативной примеси сквозь наружные ограждающие конструкции.
2. Разработать гидравлическую схему переноса консервативной примеси воздухом в замкнутом помещении.
3. Выполнить экспериментальные исследования коэффициента фильтрации.
4. Определить перенос консервативной примеси (температуры и теплоты) в конкретных замкнутых помещениях.

Научная новизна представленной работы состоит в применении результатов гидравлической теории фильтрации для расчета параметров воздухообмена через ограждающую конструкцию:

1. На основе экспериментальных данных и аналитических оценок получено эмпирическое выражение для коэффициента фильтрации $\lg_{10} \zeta \cdot \lg_{10} (k \cdot 100000) = 2,29$, связывающее коэффициент потерь напора и коэффициент фильтрации. Коэффициент фильтрации экспериментально исследованной легкой ограждающей конструкции составляет $k = 1,8 \cdot 10^{-5}$ м/с.
2. На основании экспериментальных исследований предложен полуэмпирический способ расчета воздухообмена как фильтрационный расчет неизотермического потока воздуха, переносящего консервативную примесь (температуру и теплоту).

Практическая значимость работы заключается в использовании характеристик фильтрационного потока для расчета воздухообмена помещения и определения фильтрационного переноса температуры и теплоты через ограждающую конструкцию замкнутого помещения.

Личное участие автора заключается в определении параметров воздухопроницаемости (коэффициента фильтрации и сопротивления) воздуха через ограждающую конструкцию, в разработке методики определения

фильтрационного переноса температуры и теплоты через ограждающую конструкцию замкнутого помещения и в экспериментальных исследованиях коэффициента фильтрации в натуральных условиях.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Расчет фильтрационного потока, переносящего консервативную примесь, можно производить по схеме Дюпюи. Распределение концентраций температуры и теплового потока производится с учетом уравнения переноса теплоты.
2. Для полностью изолированного помещения падение перепада давления на ограждающей конструкции происходит медленно. Поэтому в каждый момент времени можно считать фильтрацию воздуха стационарной и тогда, если известен коэффициент фильтрации, можно рассчитать величину фильтрационного расхода и оценить перенос примеси фильтрационным потоком воздуха.
3. Доля конвективного переноса консервативной примеси (теплоты) фильтрационным потоком в тепловом балансе помещения значительна и составляет до 40% в общем потоке теплоты.
4. Определение величины расхода и средней скорости в воздушных потоках при проветривании сквозь вентиляционные отверстия помещения.

Автор выражает благодарность Я.Ю. Скворцову (техн. директор по пуско-наладочным работам на теплогенерирующих и теплопотребляющих энергоустановках ЗАО "ТТМ"), П.Г. Комарову (ген. директор ООО «Авекс Плюс»), Е.Н. Жмарину (исп. директор, ООО «БалтПрофиль») за помощь в предоставлении экспериментального стенда и проведении экспериментальных исследований.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях:

1. Международная конференция «ТЭК России в XXI веке. Инновации и промышленная безопасность региональной энергетики», заседание секции «Совершенствование инженерных систем – важнейший ресурс энергосбережения», Санкт-Петербург, 2008г.
2. VII Международная конференция «Научно-технические проблемы

прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения» (RELMAS-2008), Санкт-Петербург, 17-20 июня 2008 г..

3. Круглый стол «Инженерные системы в малоэтажном строительстве и агропромышленном комплексе. Санкт-Петербург, 26 августа 2008 г..
4. Международная конференция в рамках процесса Марракеша по выработке проекта рамочных программ по устойчивому производству и потреблению на десять лет. «Энергия, здания, строительство и устойчивое развитие», Консульство Республики Финляндия в Санкт-Петербург, 15 апреля 2009 г.

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 15 трудах, опубликованных в открытой печати, из них 4 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа содержит 103 страницы основного текста, 10 таблиц, 20 рисунков, список источников из 76 наименований, приложения на 15 страницах, 11 рисунков, 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы: актуальность диссертации, цели и задачи исследований, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится описание развития теории фильтрации через ограждающие конструкции и материалы и современного уровня расчетных исследований в этой области.

В основе современной теории фильтрации лежат результаты (задачи, методы, решения), полученные впервые школой Н.Н. Павловского в Ленинградском Политехническом (Индустриальном) институте, в том числе, по изучению переноса консервативной примеси в фильтрационных потоках (А.Н. Патрашев).

Исследованиями воздухопроницаемости строительных конструкций и материалов в лабораторных и натуральных условиях занимались Ш. Ф. Акбулатов, Г.Н. Прозоровский, Е. И. Семенова, П. А. Теслер, В. П. Титов, Ф. В. Ушков, И. Я. Шикунов, П.Я. Брянцев, Б.Ф. Васильев, С.И. Ветошкин, Д.Д. Галанин, С.И. Идашкин, М.И. Субботкин, П.С. Философов, В.Д. Мачинский, К.Ф. Фокин,

А.В. Лыков, Е.В. Мадведева, И.Я. Шикунов и др. За рубежом аналогичные работы в это же время выполнялись Райшом и другими исследователями.

Экспериментальные работы в строительной отрасли, связанные с определением воздухопроницаемости и законов фильтрации для строительных материалов и ограждающих конструкций, были выполнены Р.Е. Брилингом.

Количественные оценки влияния фильтрации на теплозащитные свойства ограждений изучались В.Г. Гагариным, В.В. Козловым, А.В. Садчиковым, И.А. Мехнецовым и др. Воздухопроницаемость и фильтрация воздуха исследовались в работах В.Н. Богословского, В.М. Валова, А.Н. Цвяка, Г.А. Патохина, А.Д. Кривошейна, Г.Г. Максимова, Г.М. Позина, Т.А. Дацюк и др., в основном в связи с вопросами строительной теплофизики.

Обзор литературы показал, что недостаточно исследован вопрос о механизме фильтрации воздуха через ограждающие конструкции, большинство экспериментальных работ направлено на изучение воздухопроницаемости строительных материалов, но не конструкций.

Остается нерешенным вопрос, возможно ли для расчета фильтрации воздуха сквозь ограждающую конструкцию применять гидравлическую теорию фильтрации? Недостаточно изучен вопрос о переносе консервативной примеси (температуры и ее продольного градиента - теплового потока) при фильтрации воздуха через ограждающую конструкцию. Какова доля переносимой теплоты в общем потоке теплоты? Каковы коэффициенты фильтрации в конкретной ограждающей конструкции?

На основании критического обзора литературы были сформулированы цели и задачи работы, представленные в начале автореферата.

Во второй главе приведены результаты теоретических исследований. Рассматривается модель фильтрационного неизотермического потока воздуха через ограждающую конструкцию.

Фильтрационный перенос консервативной примеси стилизует, в том числе, теплопередачу через ограждающую конструкцию. Роль консервативной примеси играет температура, роль концентрации – безразмерный температурный

напор: $\theta := \frac{T_h - T}{T_h - T_c} \in [0,1]$. Здесь индексы h,c относятся к горячей и холодной

поверхностям

стены, см. рис.1.

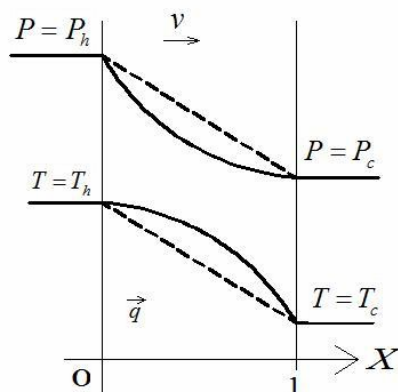


Рисунок 1. Схема фильтрации сквозь стенку.

Пунктир – чистая теплопроводность, сплошные линии - фильтрация

В условиях плавноизменяющегося фильтрационного движения (поток вдоль оси x) для средней скорости фильтрации используется формула Дюпюи:

$v = kJ$, $J := -\frac{d}{dx} \left(\frac{p}{g\rho} \right)$, k – коэффициент фильтрации, J – градиент пьезометрического

напора. По определению и используя предположение о совершенности фильтрующегося воздуха:

$$J := -\frac{d}{dx} \left(\frac{p}{g\rho} \right) = -\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{RT}{g} \right) \frac{dT}{dx} = \frac{R(T_h - T_c)}{g} \frac{d\theta}{dx},$$

$$v = \frac{kR(T_h - T_c)}{g} \frac{d\theta}{dx},$$

где R – индивидуальная газовая постоянная воздуха ($R=287$ Дж/(кг*К)= 287 м²/(с²*К)).

В предельной задаче для фильтрационной диффузии консервативной примеси (температуры) уравнение диффузии теплоты имеет

вид: $\frac{d^2\theta}{dX^2} - s \left(\frac{d\theta}{dX} \right)^2 = 0$, $X := \frac{x}{\delta} \in [0,1]$, $s := \frac{\sigma k R (T_h - T_c)}{g v}$ и решается с предельным условием:

$\theta(0) = \theta(1) - 1 = 0$. Кроме того, считается, что поровое пространство однородно и

изотропно: $k = \text{const}$. Дробь $s = \frac{\sigma k R (T_h - T_c)}{g v}$ безразмерна; это - число подобия –

фильтрационный аналог числа Рэлея.

Пусть $s=s_0=\text{const}$. Тогда решение этого уравнения имеет вид: $q_0 := \left(\frac{d\theta}{dX}\right)_{X=0} = \frac{1-\exp(-s_0)}{s_0}$, $q_1 := q(1) = \left(\frac{d\theta}{dX}\right)_{X=1} = \frac{q_0}{1-q_0 s_0}$, где q - концентрация теплового потока.

Установлено, что при малых значениях s_0 , $s_0 \ll 1$, наблюдается такое же изменение температурного напора $\theta(X)$, как и при чистой теплопроводности (линейное). Фильтрационная диффузия консервативной примеси (температуры и теплового потока) при конечных значениях фильтрационного числа Рэлея $s \gg 1$ приводит к нелинейному распределению температурного напора по ходу фильтрации, см. рис.2. При сильной неоднородности изменения коэффициента фильтрации по ходу фильтрации происходит практически скачкообразное падение температуры на холодной грани. Тепловой поток, передаваемый воздухом по ходу фильтрации, возрастает, при этом: $\frac{q_1}{q_0} = \exp(s_0)$.

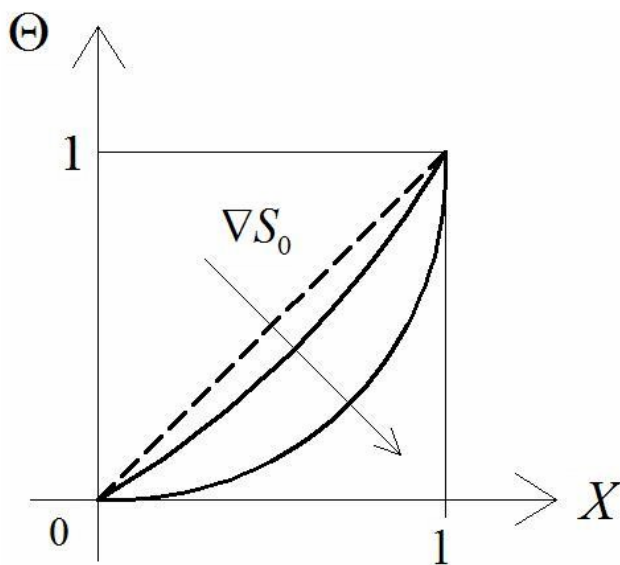


Рисунок 2. Влияние фильтрационного числа Рэлея на концентрацию напора (линейная или консервативная фильтрация).

Происходит своеобразная фильтрация примеси температуры по ходу воздушного потока. По ходу воздушного потока концентрация $\theta(X) < 1$; падение температуры наблюдается на выходе из стены. При этом одновременно увеличивается концентрация q/q_0 теплового потока, т.е. «вынос» теплоты из стены. В размерных переменных: $\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} (T_h - T_c) q(X) = \frac{\lambda}{\delta} (T_h - T_c) \frac{q_0}{1 - q_0 s_0 X}$, где λ - коэффициент теплопроводности воздуха.

Пусть $k(X) = k_0 f(X)$, $f(X) > 0$, $X \in (0, 1)$. Тогда $s = s_0 f(X)$, где $s_0 := \frac{\sigma k_0 R (T_h - T_c)}{g \nu}$. Тогда

уравнение диффузии теплоты имеет вид: $\frac{d^2 \theta}{dX^2} - s_0 f(X) \left(\frac{d\theta}{dX} \right)^2 = 0$. Предельное

условие прежнее: $\theta(0) = \theta(1) - 1 = 0$. Предельные условия – прежние, (2). Тогда:

$$\frac{1}{q(X)} = \frac{1}{q_0} - s_0 F(X), \quad F(X) := \int_0^X f d\tau,$$

$$q(X) = \frac{q_0}{1 - s_0 q_0 F(X)}, \quad q(1) = \frac{q_0}{1 - s_0 q_0 F(1)},$$

$$\theta(X) = q_0 \int_0^X \frac{dt}{1 - s_0 q_0 F(t)},$$

причем $dF/dX \geq 0$. Пусть $\theta = 1$. Тогда $X = 1$ и для определения q_0 получено

$$\text{условие: } 1 = q_0 \int_0^1 \frac{dt}{1 - s_0 q_0 F(t)}$$

Таким образом, для определения распределения концентрации примесей необходимо знать число Рэлея s_0 , т.е. величину коэффициента фильтрации.

Показано, что Распространение консервативной (и неконсервативной) примеси в фильтрационном потоке управляется положительным функционалом, необходимое условие минимума которого совпадает с уравнением переноса примеси в потоке. Вдоль хода фильтрации изменение теплового потока в среднем минимально.

В качестве модели экспериментального исследования рассматривается жилое здание с легкими ограждающими конструкциями. Все неплотности в стенах и остеклениях, а так же вытяжные отверстия системы вентиляции перекрыты. Контроль плотности помещения осуществляется тепловизионной съемкой наружной и внутренней поверхности здания. Перепад давления и градиент давления на стенке осуществляется нагнетанием воздуха в помещение вентилятором. Избыточное давление в помещении составляет от 25 до 60 Па. Воздухообмен осуществляется только за счет воздухопроницаемости ограждений, а теплопередача за счет теплопроводности и конвекции. Воздух движется (фильтруется) сквозь поровое пространство ограждения с низкими характерными числами Рейнольдса, $Re \ll 1$, или $Re = O(1)$. Тогда, для определения средней

скорости воздуха сквозь ограждение используется формула Дюпюи $v = k \frac{\Delta P}{\delta \rho g}$. При

известном перепаде давления скорость фильтрации определяется так $v = \varphi \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$.

Отсюда следует, что для расчета средней скорости нужно знать коэффициент фильтрации или эффективный коэффициент сопротивления, показана связь

$$\text{между ними } \zeta = O\left(\frac{(g\delta)^2 2\rho}{k^2 \Delta p}\right).$$

Следовательно, существует условие подобия $\frac{\zeta_1 k_1^2}{\delta_1^1} = \frac{\zeta_2 k_2^2}{\delta_2^2} = \frac{1}{T^2}$, где T – масштаб времени («время фильтрации»). Получается: для сравниваемых фильтрационных потоков времена фильтрации одинаковы $\frac{kT}{\delta} \sqrt{\zeta} = 1$.

Таким образом, установлено подобие, которое позволяет, просчитав на основании экспериментального опыта коэффициент фильтрации для одной конструкции, пересчитать для другой конструкции.

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

Устанавливается период релаксации давления в помещении.

Дифференциальное уравнения баланса массы: $\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{kART}{gV} \frac{\partial h}{\partial x}$ решается с

начальным условием: $h(0, x) = H(x) = h_0(1 - \bar{x}) = h_0(1 - \frac{x}{\delta})$. Из условия линейного

начального распределения напора по толщине стенки находится частное решение

$$h(x, t) = h_0(1 - \frac{x + \alpha t}{\delta}). \text{ При условии, что } x=0 \quad h(0, t) = h_0(1 - \frac{\alpha t}{\delta}), \text{ если}$$

$$t = \frac{\delta}{\alpha} = T_0, \quad h(0, \frac{\delta}{\alpha}) = 0. \text{ Тогда в любом сечении } x > 0, \text{ если } t = \frac{\delta - x}{\alpha} = T_x, \quad h(x, T_x) = 0, \text{ т.е.}$$

давление выравнивается. Депрессионная кривая становится короче. Скорость

перемещения фронта давления вверх по течению, очевидно, равна

$\alpha: \frac{dx}{dt} = -\alpha$, т.е.: $\frac{dx}{dt} = -\frac{ARTk}{gV}$. Значит, скорость фильтрации переменна по времени.

Период релаксации избыточного давления в помещении составляет десятые доли часа. Для поддержания давления необходимо 3-4 кратное включение вентиляции.

Сформулировано начальное условие Коши $h(0, x) = H(x)$. В результате получили $\tau_o = 1 - \frac{C^2 t^2}{16h_o} < 1$, т.е. при наличии вентиляционных отверстий разгерметизация произойдет быстрее, чем при отсутствии вентиляционных отверстий. Время снижения давления тем меньше, чем больше коэффициент Шези для вентиляционного отверстия, т.е. чем больше пропускная способность вентиляции.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования коэффициента фильтрации легкой ограждающей конструкции. Целью исследования было определение коэффициента фильтрации через ограждающую конструкцию, определение кратности воздухообмена помещений здания от инфильтрации при перепаде давлений снаружи и внутри в 50 Па, а также связь коэффициента фильтрации и эффективного коэффициента сопротивления.

Испытания проведены в натуральных условиях в соответствии с ГОСТ 31167-2009 «Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях».

Объект экспериментального исследования – фильтрационный поток воздуха, проходящий через ограждение жилого здания. Здание двухэтажное с чердаком расположено в Ленинградской области, поселок Коробицино (рис1.).

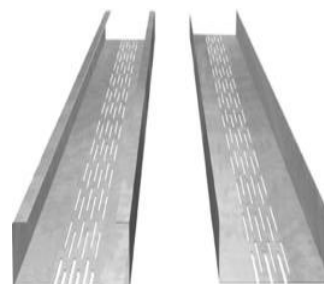


Рисунок 1. Коттедж, Ленинградская область, поселок Коробицино

Рисунок 2. Термопрофиль

Несущим элементом ограждающей конструкции (рис.3) является легкий тонкостенный профиль, так называемый - термопрофиль 1 (рис.2). К нему посредством саморезов крепится горизонтальная обрешетка 3. С наружной стороны к обрешетке 3 саморезами крепится вертикальная обрешетка 4, к которой также саморезами крепится вагонка 5. Внутри термопрофиля 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 °С). 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.

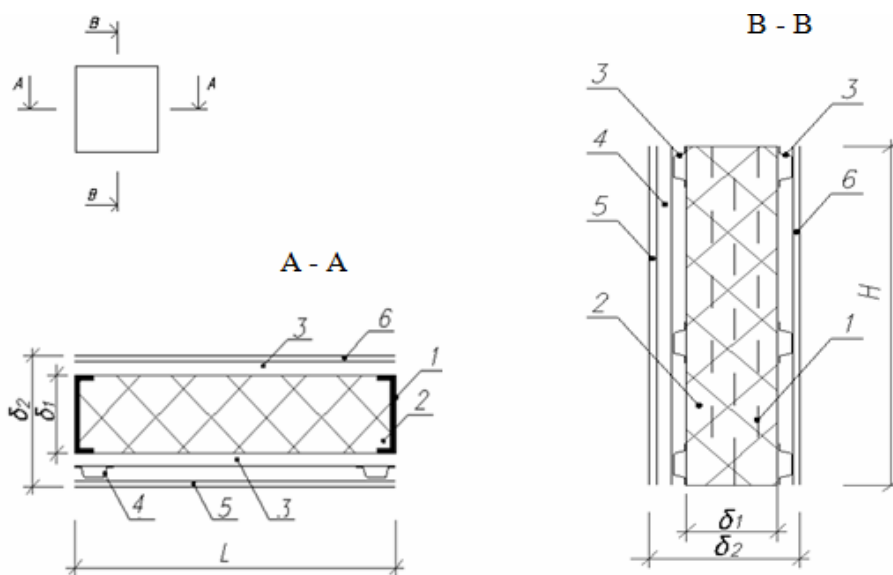


Рисунок 3. Ограждающая конструкция.

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; δ_1 – толщина утеплителя, мм; δ_2 – толщина конструкции, мм.

Толщина ограждающей конструкции $\delta_2 = 300$ мм Проектное сопротивление теплопередаче наружных стен коттеджа $R_0 = 4,6$ (м²°С)/Вт. Окна – однокамерный стеклопакет. Вентиляция – естественная. Система отопление горизонтальная двухтрубная от отопительного котла. Полы коттеджа утепленные.

Для испытаний выбраны два помещения на первом и втором этажах. На первом этаже помещение бытового назначения расположено в осях D-E и 1-2, на втором этаже жилая комната в осях A-B и 2-3.

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 герметизированы вытяжные каналы вентиляции и технологические отверстия в стенах и перекрытиях. С помощью тепловизора проведена тепловизионная съемка и установлено, что щели в местах установки окон, примыканиях стен с кровлей отсутствуют, воздушный поток фильтруется через стенки.

Для измерения фильтрационного потока воздуха через ограждающую конструкцию в испытываемое помещение с помощью вентилятора нагнетали, а затем отсасывали из него воздух. Вентилятор с помощью воздухонепроницаемого полотнища и раздвижной рамы закрепили в дверном проеме испытываемых помещений. После включения, вентилятор создавал в помещении перепад давления между внутренним и наружным воздухом. Регулируя расход воздуха, $Q = \text{var}$, создавалось ступенчатое изменение давления $\Delta P = \text{var}$. При фиксированном перепаде давления между испытываемым объемом и наружной средой измеряли расход воздуха через вентилятор. Установка испытательного стенда представлена на рисунке 4.



**Рисунок 4. Помещение, расположенное на первом этаже
а) с повышением давления; б) с понижением давления.**

Графики с экспериментальными данными и их аппроксимацией показаны на рисунках 5-6.

Экспериментально установлено, что средняя воздухопроницаемость ограждающих конструкций при закрытых вентиляционных каналах в испытанных помещениях здания и разности давлений внутреннего и наружного воздуха 50 Па обеспечивает воздухообмен кратностью: $n_{50} = 2,0 \pm 0,18 \text{ ч}^{-1}$.

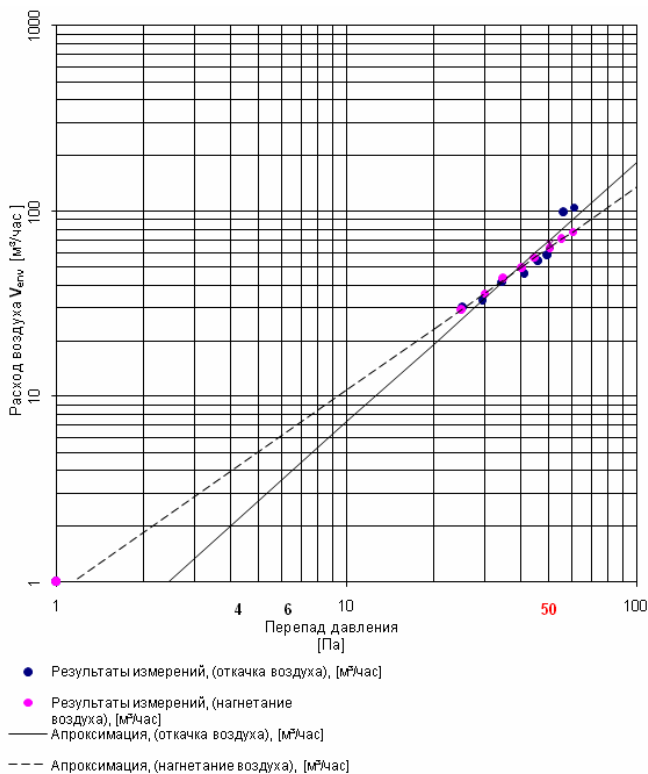


Рисунок 5. График зависимости объемного расхода воздуха через ограждающую конструкцию от разности давлений между испытываемым объемом и наружной стеной. Помещение первого этажа.

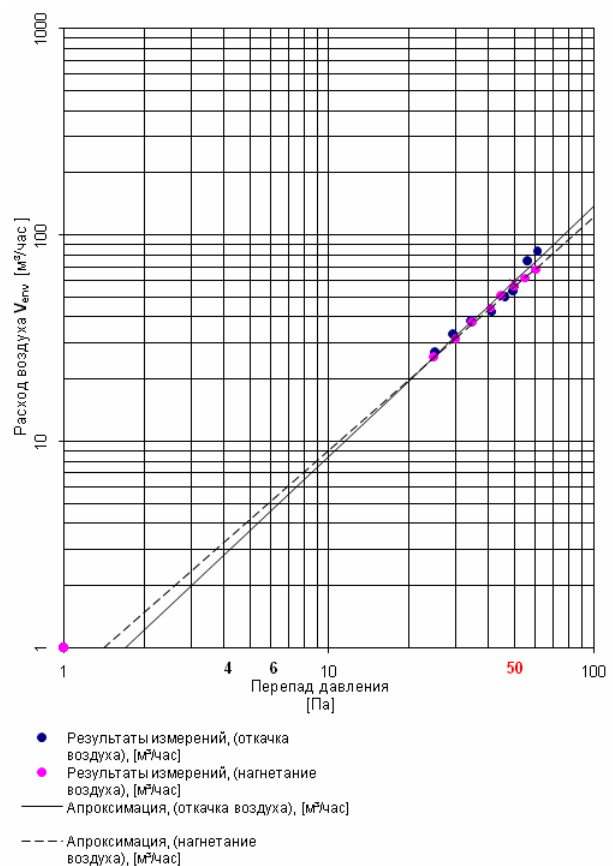


Рисунок 6. График зависимости объемного расхода воздуха через ограждающую конструкцию от разности давлений между испытываемым объемом и наружной стеной. Помещение второго этажа.

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

На основании установленных перепадах давления и расхода воздуха определены значения параметров воздухопроницаемости (коэффициент фильтрации и эффективный коэффициент сопротивления) воздуха через ограждающую конструкцию (таблица 1).

Так для помещения первого этажа с площадью ограждений помещения $77,04 \text{ м}^2$, площадью наружной стены $A = 21,6 \text{ м}^2$ при перепаде давления воздуха внутри и снаружи помещения 50 Па , расход воздуха равен $62 \text{ м}^3/\text{ч}$. Скорость фильтрации воздушного потока сквозь легкую ограждающую конструкцию помещения первого этажа равняется $v = 0,2235 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$, средний коэффициент фильтрации $-k = 1,58 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$, эффективный коэффициент сопротивления составляет $\zeta = 16,68 \cdot 10^8$.

Для помещения второго этажа с площадью ограждений помещения $58,32 \text{ м}^2$, площадью наружной стены $A = 7,2 \text{ м}^2$ при перепаде давления воздуха 50 Па , расход воздуха равен $55 \text{ м}^3/\text{ч}$, скорость фильтрации воздушного потока составляет $v = 0,26 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}}$, средний коэффициент фильтрации - $k = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$, эффективный коэффициент сопротивления $\zeta = 12,14 \cdot 10^8$.

По порядку величин коэффициента фильтрации установлено ламинарное движение, таким образом, применим закон Дарси или его гидравлический аналог Дюпюи.

Экспериментально установлено, что средний коэффициент фильтрации экспериментально исследуемой легкой ограждающей конструкции равен $k = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$. Коэффициент фильтрации, $k, \text{ м/с}$, от градиента напора, $I, \text{ Па/м}$, не зависит (рис.7), что свидетельствует о выполнении законов Дарси и Дюпюи в области небольших градиентов напора.

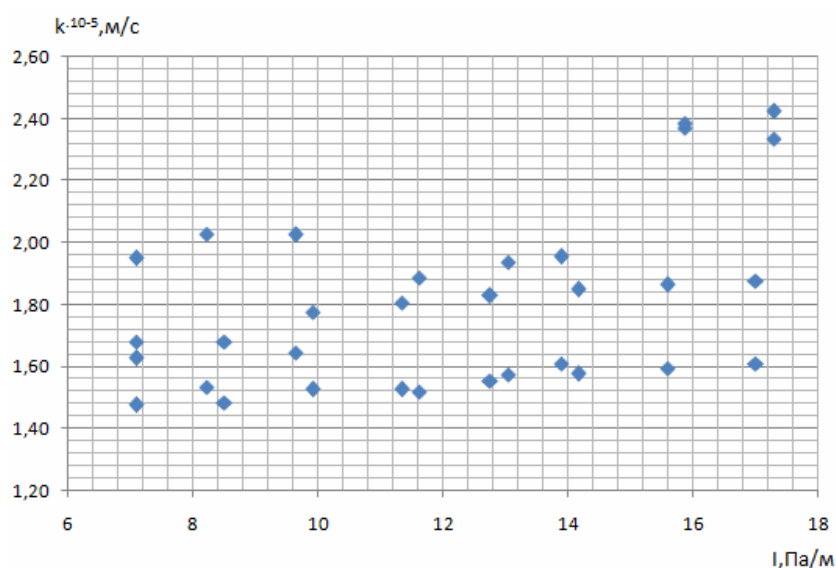


Рисунок 7. Зависимость коэффициента фильтрации от градиента напора

На основании эксперимента установлена линейная зависимость между ζ и k , см. рис.8, и получено эмпирическое выражение для коэффициента фильтрации $\lg_{10} \zeta \cdot \lg_{10} (k \cdot 100000) = 2,29$, связывающее коэффициент потерь напора и коэффициент фильтрации.

Зависимость скорости движения воздуха от коэффициента фильтрации не установлена, разброс точек вызван разными площадями ограждающих конструкций (рисунок 9).

Таблица 1. Значения параметров воздухопроницаемости (коэффициента фильтрации и эффективного коэффициента сопротивления) воздуха через ограждающую конструкцию

ΔP , Па	Q , м ³ /ч	A , м ²	$J = \frac{\Delta H}{H}$, Па/м	Q , м ³ /с	$v \cdot 10^{-3}$, м/с	$k \cdot 10^{-5}$, м/с	$\lg_{10}(k \cdot 10^{-5})$	$\zeta \cdot 10^{+8}$	$\lg_{10} \zeta$	$\lg_{10} \zeta \cdot \lg_{10}(k \cdot 10^{-5})$
61	88	58,32	17,29	0,024	0,42	2,42	0,38	5,79	8,76	3,37
56	79	58,32	15,87	0,022	0,38	2,37	0,37	6,59	8,82	3,31
49	57	58,32	13,89	0,016	0,27	1,95	0,29	11,08	9,04	2,63
46	53	58,32	13,04	0,015	0,25	1,94	0,29	12,03	9,08	2,61
41	46	58,32	11,62	0,013	0,22	1,89	0,28	14,23	9,15	2,52
34	41	58,32	9,64	0,011	0,20	2,03	0,31	14,86	9,17	2,81
29	35	58,32	8,22	0,010	0,17	2,03	0,31	17,39	9,24	2,84
25	29	58,32	7,09	0,008	0,14	1,95	0,29	21,84	9,34	2,71
60	67	58,32	17,01	0,019	0,32	1,88	0,27	9,82	8,99	2,46
55	61	58,32	15,59	0,017	0,29	1,86	0,27	10,86	9,04	2,44
50	55	58,32	14,17	0,015	0,26	1,85	0,27	12,14	9,08	2,42
45	49	58,32	12,76	0,014	0,23	1,83	0,26	13,77	9,14	2,40
40	43	58,32	11,34	0,012	0,20	1,81	0,26	15,89	9,20	2,36
35	37	58,32	9,92	0,010	0,18	1,78	0,25	18,78	9,27	2,31
30	30	58,32	8,50	0,008	0,14	1,68	0,23	24,49	9,39	2,12
25	25	58,32	7,09	0,007	0,12	1,68	0,23	29,39	9,47	2,13
61	112	77,04	17,29	0,031	0,40	2,34	0,37	6,23	8,79	3,24
56	105	77,04	15,87	0,029	0,38	2,39	0,38	6,51	8,81	3,33
49	62	77,04	13,89	0,017	0,22	1,61	0,21	16,34	9,21	1,90
46	57	77,04	13,04	0,016	0,21	1,58	0,20	18,15	9,26	1,83
41	49	77,04	11,62	0,014	0,18	1,52	0,18	21,89	9,34	1,70
34	44	77,04	9,64	0,012	0,16	1,65	0,22	22,51	9,35	2,02
29	35	77,04	8,22	0,010	0,13	1,54	0,19	30,35	9,48	1,77
25	32	77,04	7,09	0,009	0,12	1,63	0,21	31,30	9,50	2,01
60	76	77,04	17,01	0,021	0,27	1,61	0,21	13,32	9,12	1,89
55	69	77,04	15,59	0,019	0,25	1,60	0,20	14,81	9,17	1,86
50	62	77,04	14,17	0,017	0,22	1,58	0,20	16,68	9,22	1,83
45	55	77,04	12,76	0,015	0,20	1,55	0,19	19,07	9,28	1,78
40	48	77,04	11,34	0,013	0,17	1,53	0,18	22,26	9,35	1,72
35	42	77,04	9,92	0,012	0,15	1,53	0,18	25,44	9,41	1,73
30	35	77,04	8,50	0,010	0,13	1,48	0,17	31,40	9,50	1,63
25	29	77,04	7,09	0,008	0,10	1,48	0,17	38,11	9,58	1,62

Для изученной конструкции установлен закон подобия, связывающий коэффициент фильтрации и теплоемкости через параметр подобия $N = \frac{k^2}{c_p T}$,

$$N = 5,7 \cdot 10^{-14}.$$

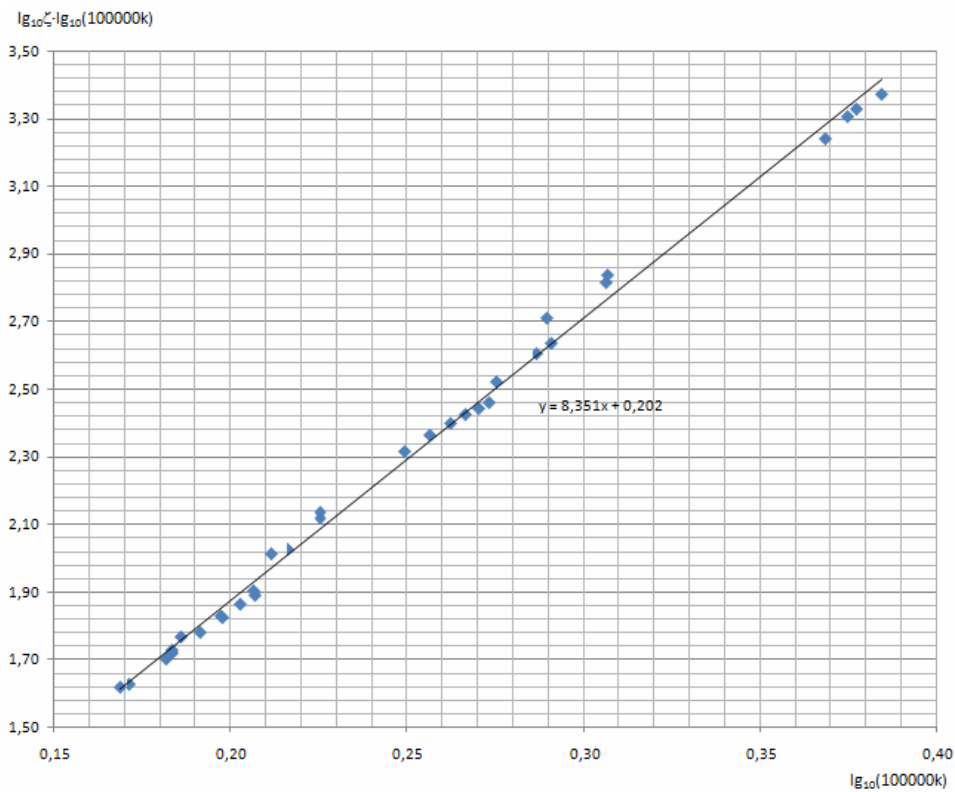


Рисунок 8. Зависимость $\lg_{10} \zeta$ и $\lg_{10}(k \cdot 100000)$

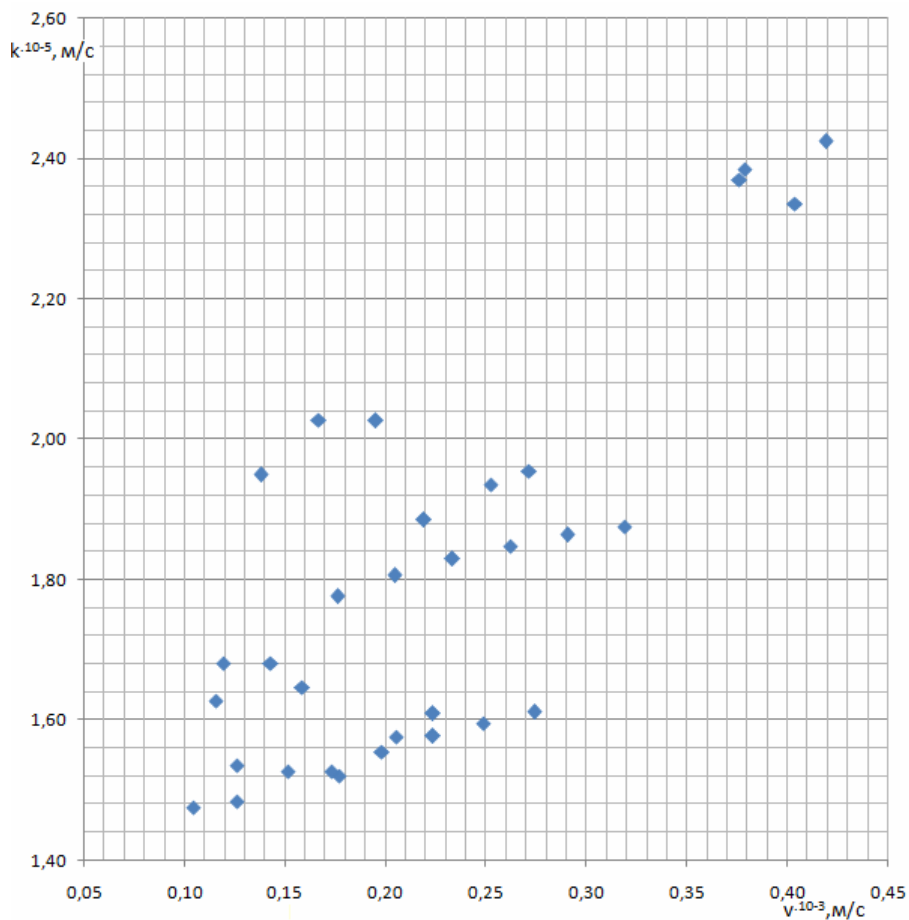


Рисунок 9. Зависимость коэффициента фильтрации от скорости движения воздушного потока

В четвертой главе приведены практические рекомендации по расчету

воздухообмена в помещении.

На основании результатов теоретического и экспериментального исследования кратность воздухообмена от инфильтрационного воздуха определяем при разности давлений наружного и внутреннего воздуха 50 Па в следующей последовательности:

1) определяем расход воздуха:

$$Q = k \frac{\Delta P}{\delta \rho g} A$$

2) определяем кратность воздухообмена:

$$n = \frac{Q}{V}$$

Рассчитаем кратность воздухообмена от инфильтруемого воздуха жилых комнат двухэтажного коттеджа при разности давлений наружного и внутреннего воздуха $\Delta P = 50$ Па. Толщина конструкции $\delta = 0,3$ м. Расчет сведем в таблицу 2.

Таблица 2. Значения параметров воздухообмена по помещениям при $\Delta P = 50$ Па

№п/п	$A_{ок}, м^2$	$A_{ст}, м^2$	$S_{пом}, м^2$	$V_{пом}, м^3$	$Q, м^3/ч$	n	B
1	2	3	4	5	6	7	8
Первый этаж							
1	2,88	17,24	13,74	37,1	15,80	0,43	$9,18 \cdot 10^{-6}$
2	2,1	9,24	16,61	44,85	8,50	0,19	$4,14 \cdot 10^{-6}$
3	8,91	18,71	21,73	58,67	17,20	0,29	$1,33 \cdot 10^{-6}$
4	6,72	22,1	23,88	64,48	20,30	0,31	$1,00 \cdot 10^{-6}$
Второй этаж							
5	1,92	4,56	9,23	24,91	4,19	0,17	$9,45 \cdot 10^{-6}$
6	1,92	20,63	14,04	37,91	18,94	0,50	$0,71 \cdot 10^{-6}$

Для жилых зданий требуемая кратность воздухообмена 0,35.

3) Определяем время, за которое давление в замкнутом помещении упадет по формуле:

$$\alpha = \frac{kART}{gV} = \frac{1,8 \cdot 10^{-8} \cdot 70 \cdot 287 \cdot 293}{9,8 \cdot 37,1} = 2,91 \cdot 10^{-4}$$

$$t = \frac{\delta}{\alpha} = \frac{0,3}{2,91 \cdot 10^{-4}} = 10^3 c$$

Таким образом, достаточно подавать воздух в помещение 3 раза в час, чтобы создать давление 50 Па и обеспечить проветривание в помещении.

Как видно из приведенных расчетов кратность воздухообмена зависит от

формы помещения.

Инfiltrация воздуха удовлетворяется некоторому закону подобия: $\frac{\zeta k^2}{\delta^2} = \frac{1}{T^2}$.

T – время релаксации помещения, т.е. время в течение которого давление в изолируемом помещении упадет до нуля и инfiltrация воздуха прекратится.

Тогда: $kR^2 = \frac{V}{T}$, $\delta R^2 \cong V\sqrt{\zeta}$, $\delta R^2 = BV\sqrt{\zeta}$.

B - коэффициент пропорциональности; для всех исследуемых помещений имеет примерно одинаковое значение (порядка 10^{-6}).

Основные результаты и выводы

Полученные в диссертационной работе результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Показано, что на промежутке времени от $0 < t < (\delta/K)$ тепловой поток переносимый фильтрацией сопоставим с тепловым потоком за счет теплопроводности. При открытой системе вентиляции сквозь стенку проходит тепловой поток вызванный теплопроводностью, а сквозь вентиляционные отверстия проходит конвективный тепловой поток. Общий баланс меняется в сторону резкого увеличения тепловых потерь.

2. Получено эмпирическое выражение для коэффициента фильтрации $\lg_{10} \zeta \cdot \lg_{10} (k \cdot 100000) = 2,29$, связывающее коэффициент потерь напора и коэффициент фильтрации. Коэффициент фильтрации экспериментально исследованной легкой ограждающей конструкции составляет $k = 1,8 \cdot 10^{-5}$ м/с.

3. Установлено, что средняя воздухопроницаемость ограждающих конструкций при закрытых вентиляционных каналах в испытанных помещениях здания и разности давлений внутреннего и наружного воздуха 50 Па обеспечивает воздухообмен кратностью: $n_{50} = 2,0 \pm 0,18$ ч⁻¹

4. Показано, что воздухопроницаемость конструкций и кратность воздухообмена в испытанных помещениях соответствует нормативным требованиям.

5. Установлен закон подобия, связывающий коэффициент фильтрации и теплоемкости изученной конструкции легкого ограждения: $N = 5,7 \cdot 10^{-14}$, где $N = \frac{k^2}{c_p T}$

Результаты работы внедрены в ПНИПКУ «Венчур» для расчета температурно-влажностного режима и параметров воздухообмена зданий и сооружений с легкими ограждающими конструкциями.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих **журналах по перечню ВАК:**

1. Кузьменко Д. В. (Петросова Д.В.) Ограждающая термопанель с каркасом из термопрофилей / Д. В. Кузьменко // Жилищное строительство. - 2009. - №4. – с. 12-14.
2. Кузьменко Д.В. (Петросова Д.В.) Ограждающая конструкция на базе легких стальных конструкций / Д. В. Кузьменко // Строительные материалы. - 2009. - № 4. - с. 123-125.
3. Петросова Д. В. Фильтрация воздуха через ограждающие конструкции / Д. В. Петросова // Инженерно-строительный журнал. - 2012.- №2(28). - С. 24-31.
4. Петросова Д.В. Количественная оценка величины переноса консервативной примеси фильтрационным потоком через стену / Д. В. Петросова // Инженерно-строительный журнал. -2012. - №6(32) – С. 36-41.