



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА»  
(МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА)

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ  
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА  
(НИИ МЕХАНИКИ МГУ)

УДК 691.539.216; 532.516:4

№ регистрации

Дата регистрации

Инв. №

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. директора НИИ механики МГУ  
профессор РАН



Д.В. Георгиевский  
2025 г.

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИССИИ ВОЛОКОН ИЗДЕЛИЙ ИЗ МИНЕРАЛЬНОЙ ВАТЫ  
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ IZOLIFE, И  
РАСЧЕТ ЭМИССИИ ПРИ ВОЗМОЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ТЕЧЕНИЕ 50-ТИ ЛЕТ В  
НАВЕСНОЙ ФАСАДНОЙ СИСТЕМЕ ПО МЕТОДИКЕ ГОСТ Р 56732

(заключительный)

по Договору № 107-С83/2024 с ООО «ВКТМ»

Руководитель работ:  
Зав. лаб. аэромеханики и  
волновой динамики, к.т.н.

П.П. Пастушков

Москва 2025 г.

## **СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ**

Пастушков П.П., зав. лаб., к.т.н.  
(введение, раздел 5, заключение)

Гагарин В.Г., вед. науч. сотр., д.т.н., проф.  
(раздел 2)

Симоненко М.М., вед. науч. сотр., к.ф.-м.н.  
(раздел 2)

Павленко Н.В., науч. сотр., к.т.н., доц.  
(раздел 4)

Кубенин А.С., науч. сотр., к.т.н.  
(раздел 3)

Роднов А.В., вед. инж.  
(раздел 4)

Шилов А. Б, техник  
(раздел 4)

Заключение содержит: 25 стр., 9 рис., 4 табл., 23 источн.

## ЭМИССИЯ ВОЛОКОН, ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОТОК ВОЗДУХА, МИНЕРАЛОВАТНЫЕ ПЛИТЫ

Объект исследования – изделий из минеральной ваты теплоизоляционные, применяемые в строительстве 3-х марок: IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА, IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ и IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА производства ООО «ВКТМ».

Цель работы – определение эмиссии волокон плит теплоизоляционных минераловатных указанных марок испытанием в лабораторной установке после искусственного состаривания по методике ГОСТ Р 56732-2015.

В результате выполнения научно-технической работы проведены экспериментальные исследования эмиссии волокон из плит теплоизоляционных минераловатных марок: IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА, IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ и IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА после искусственного состаривания образцов по методике ГОСТ Р 56732-2015 «Материалы и изделия теплоизоляционные. Методы определения характеристик эмиссии волокон при обдувании воздухом». Установлены значения средних скоростей эмиссии волокон при возможном использовании исследованных марок плит в навесной фасадной системе с вентилируемой прослойкой при эксплуатации в течение 50 лет, а также изменение сопротивления теплопередаче ограждения за 50 лет эксплуатации.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

1.	ВВЕДЕНИЕ	5
2.	МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭМИССИИ ВОЛОКОН ИЗ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	7
2.1	Исходное уравнение математической модели эмиссии волокон из минераловатных теплоизоляционных материалов при их обдуве струей воздуха	7
2.2	Вывод уравнения эмиссии волокон из минеральной ваты	8
2.3	Оценка эмиссии волокон из волокнистых теплоизоляционных материалов на их теплозащитные свойства	12
3.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИССИИ ВОЛОКОН ПЛИТ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МИНЕРАЛОВАТНЫХ	15
3.1	Подготовка к испытаниям. Искусственное состаривание образцов	15
3.2	Определение эмиссии волокон в лабораторной установке	16
4.	РАСЧЕТ ЭМИССИИ ВОЛОКОН ИЗ ПЛИТ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПРИ ВОЗМОЖНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В НАВЕСНОЙ ФАСАДНОЙ СИСТЕМЕ С ВЕНТИЛИРУЕМОЙ ПРОСЛОЙКОЙ	21
5.	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	23
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	24

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

Введение повышенных требований к теплозащите ограждающих конструкций [1] привело к развитию конструктивных решений с применением эффективных теплоизоляционных материалов. К новым ограждающим конструкциям относятся теплоизоляционные навесные фасадные системы (НФС) с вентилируемой воздушной прослойкой.

Ограждающие конструкции с вентилируемыми воздушными прослойками давно использовались при строительстве зданий. Применение вентилируемых воздушных прослоек имело одну из следующих целей:

- нормализация влажностного режима ограждающих конструкций, которые в силу особенностей их эксплуатации характеризовались повышенным влагонакоплением (например, стены производственных зданий с мокрым режимом);
- предотвращение перегрева конструкций солнечной радиацией (например, совмещенные покрытия);
- защита конструкций от увлажнения атмосферной влагой (косыми дождями).

Основная цель, с которой в настоящее время применяются (НФС) с вентилируемой воздушной прослойкой – повышение до уровня нормативных требований теплозащиты ограждающих конструкций зданий с нормальным температурно-влажностным режимом. Основными отличиями конструкций современных НФС от давно известных стен с вентилируемой воздушной прослойкой является наличие мощного теплоизоляционного слоя, металлической подконструкции и облицовочного слоя, определяющего архитектурный облик здания. Если стены с вентилируемой воздушной прослойкой применялись в малоэтажных зданиях, НФС применяются и в многоэтажных зданиях высотой в десятки метров, что также определяет специфику их эксплуатационных свойств.

Накопленный опыт проектирования, строительства и эксплуатации НФС для многоэтажных зданий привел к разработке методов оценки их теплофизических

свойств с частичным учетом аэродинамических эффектов в воздушной прослойке на стадии проектирования [2-11].

В связи с обсуждением вопроса о необходимости установки ветрозащитной пленки в конструкции НФС возникла необходимость более внимательного рассмотрения процессов, происходящих в воздушной прослойке конструкции [12, 13]. Одним из аргументов в пользу установки ветрозащитных пленок является возможная эмиссия волокна, которая объясняется следующими соображениями. При движении воздуха вдоль поверхности минеральной ваты, не защищенной ветрозащитной пленкой, на приповерхностные волокна действует аэродинамическая сила, вызывающая напряжения растяжения в сечении волокна и касательные напряжения в капельках связующего, которое закрепляет волокно в материале. Вследствие нарастания усталостных явлений волокна могут отрываться и вылетать из воздушной прослойки. Это явление и получило название «эмиссия волокна» [14, 15]. Теоретический и экспериментальный опыт НИИ механики МГУ исследований проблемы эмиссии волокон из минеральной ваты лег в основу национального стандарта ГОСТ Р 56732-2015 «Материалы и изделия теплоизоляционные. Методы определения характеристик эмиссии волокон при обдувании воздухом» [16].

Настоящее заключение посвящено описанию экспериментальных исследований по методике ГОСТ Р 56732-2015 [16] эмиссии волокна из плит теплоизоляционных минераловатных марок: IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА, IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ и IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА после искусственного состаривания.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭМИССИИ ВОЛОКОН ИЗ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 2.1 Исходное уравнение математической модели эмиссии волокон из минераловатных теплоизоляционных материалов при их обдуве струей воздуха

При движении воздуха вдоль поверхности волокнистых теплоизоляционных материалов (минеральной ваты) на приповерхностные волокна действует аэродинамическая сила, вызывающая напряжения растяжения в сечении волокна и касательные напряжения в капельках связующего, которое закрепляет волокно в материале. Эти напряжения пропорциональны средней силе аэродинамического воздействия. В случае, когда целостность связующего нарушена, остается сила сцепления волокон в материале. Сила сцепления волокон в материале пропорциональна упругой силе контакта переплетенных волокон в слое материала и коэффициентам трения (сухого и вязкого).

Аэродинамическая сила содержит квазистационарную (среднюю) и пульсационную составляющие. Средняя составляющая аэродинамической силы пропорциональна некоторой степени средней скорости потока  $u$ . Пульсационная составляющая – связана с хаотическими турбулентными пульсациями, которые всегда присутствуют в потоке воздуха около шероховатой поверхности [17, 18]. Основной характеристикой турбулентных пульсаций скорости потока является их интенсивность,  $I$ , м/с, которая определяется выражением [19, 20]:

$$I = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{k}{\rho}}, \quad (2.1)$$

где  $k$  – энергия турбулентных пульсаций в единице объема, Дж/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Частота турбулентных пульсаций изменяется в широком диапазоне спектра. Это может вызывать резонансные явления в упруго сцепленных волокнах, заставляя их вибрировать, что должно снижать средний коэффициент сухого трения. В целом, сила сцепления (сдвиговая прочность) в приповерхностном слое материала в

условиях динамического воздействия турбулентных пульсаций должна быть значительно ниже, чем при статическом нагружении [21]. В то же время, чем меньше силы сцепления волокон в материале, тем больше их эмиссия. Кроме того, под действием вибраций в волокнах материала и в связующем могут накапливаться усталостные повреждения, снижающие силу сцепления волокон. Приблизительно, суммарный вклад перечисленных эффектов пропорционален интенсивности пульсаций аэродинамической силы.

На основании этих положений математическая модель процесса эмиссии волокон может быть сформулирована следующим образом. Плотность потока эмиссии волокон материала  $j$ , кг/(м<sup>2</sup> с), описывается уравнением:

$$j = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dz}, \quad (2.2)$$

$$j = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dz} = K \frac{\rho_M \cdot I \cdot F_a}{F_f}, \quad (2.3)$$

где  $m$  – масса исследуемого образца, кг;

$z$  – время, с;

$A$  – площадь образца, обдуваемая потоком воздуха, м<sup>2</sup>;

$\rho_M$  – плотность исследуемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$F_a$  – средняя сила аэродинамического воздействия воздуха на приповерхностные волокна, Н;

$I$  – интенсивность турбулентных пульсаций, м/с;

$F_f$  – средняя сила сцепления волокон в материале, Н;

$K$  – безразмерный параметр подобия, определяемый геометрическими, механическими и физическими свойствами структуры материала и параметров окружающей среды.

## 2.2 Вывод уравнения эмиссии волокон из минеральной ваты

Аэродинамическая сила  $F_a$  складывается из поперечной силы сопротивления  $F_p$  и продольной силы трения  $F_\tau$

$$F_p = 0,5 \cdot \rho \cdot u_0^2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \delta \cdot l \cdot C_x ,$$



$$F_{\tau} = 0,5 \cdot \rho \cdot u_0^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \pi \cdot \delta \cdot l \cdot C_{\tau}, \quad (2.4)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$u_0 = u(h_0)$ ,  $u$  – скорость потока воздуха в пограничном слое, м/с;

$h_0$  – толщина активного слоя, в котором происходит взаимодействие волокон с воздушным потоком, м;

$\theta$  – угол между волокном направлением скорости потока, рад.;

$\delta$  – средняя толщина, м;

$l$  – средняя длина волокон в материале, м;

$C_x$   $C_{\tau}$  – безразмерные коэффициенты аэродинамического сопротивления и трения, зависящие от чисел Рейнольдса  $Re_{\delta}$  и  $Re_l$  соответственно:

$$Re_{\delta} = \rho \cdot u \cdot \delta / \mu, \quad Re_l = \rho \cdot u \cdot l / \mu = Re_{\delta} \cdot l / \delta, \quad (2.5)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости воздуха, кг/(м с).

При расположении волокна поперек потока ( $\theta = \pi/2$ ) доминирующей является сила сопротивления  $F_p$ , при отклонении волокна вдоль потока, превалирует сила трения  $F_{\tau}$ . В общем случае волокно совершает угловые колебания и среднее значение аэродинамической силы с учетом выражений (2.4) можно оценить как

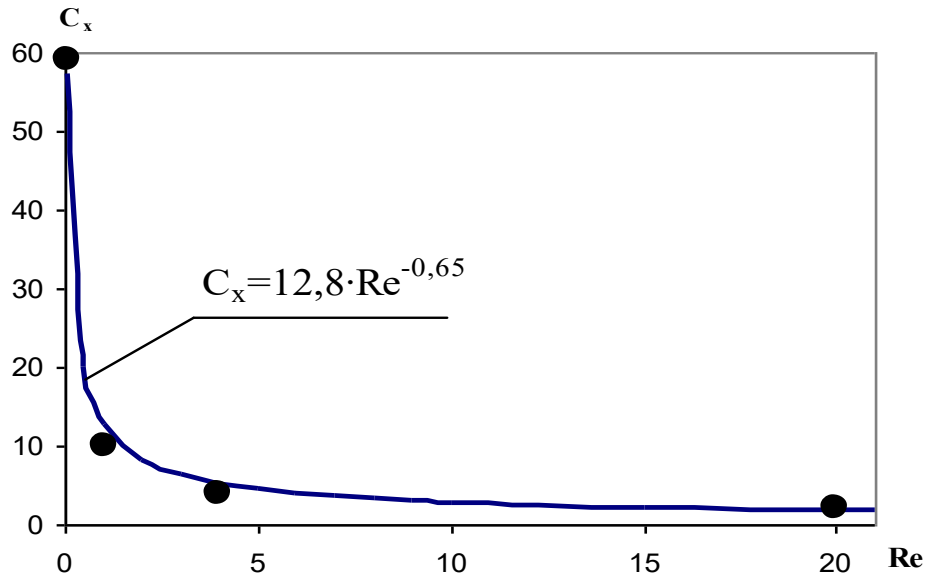
$$F_a = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} (F_p + F_{\tau}) d\theta = 0,25 \cdot \rho \cdot u_0^2 \cdot \delta \cdot L \cdot (C_x + \pi \cdot C_f). \quad (2.6)$$

При характерной толщине волокон 0,005÷0,01 мм и скорости потока 0,3÷30 м/с и нормальных атмосферных условий рабочим диапазоном изменения числа Рейнольдса является интервал  $0,1 < Re < 20$ . Согласно экспериментальным данным для сопротивления цилиндров [36], коэффициент сопротивления  $C_x$  в выражении (2.2.4) изменяется при  $0,1 < Re_{\delta} < 20$  более чем в 10 раз и его можно аппроксимировать эмпирической степенной зависимостью (рис. 2.1):

$$C_x = 12,8 \cdot Re_{\delta}^{-0,65}. \quad (2.7)$$

Коэффициент трения можно оценить по формуле [22]:

$$C_{\tau} = 0,074 \cdot Re_L^{-0,2} = 0,074 \cdot (\delta / L)^{0,2} \cdot Re_{\delta}^{-0,2}. \quad (2.8)$$



**Рис. 2.1** Зависимость коэффициента сопротивления цилиндрического волокна от числа Рейнольдса [20] (точки – экспериментальные данные, кривая – степенная аппроксимация)

В результате (2.5)-(2.8) получаем:

$$F_a = 0,25 \cdot \rho \cdot u_0^2 \cdot \delta \cdot L \cdot (12,8 \cdot Re_\delta^{-0,65} + 0,23 \cdot (\delta/L)^{0,2} \cdot Re_\delta^{-0,2}). \quad (2.9)$$

Для рассматриваемого диапазона чисел Рейнольдса  $0,1 < Re_\delta < 20$  второе слагаемое в скобках пренебрежимо мало по сравнению с первым, поэтому окончательное выражение для аэродинамической силы  $F_a$  принимает вид:

$$F_a = 3,2 \cdot \rho \cdot u_0^2 \cdot \delta \cdot L \cdot Re_\delta^{-0,65}. \quad (2.10)$$

Интенсивность турбулентных пульсаций в пограничном слое выражается формулой Прандтля [23]:

$$I = l_1 \cdot \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|, \quad l_1 = \kappa \cdot y, \quad (2.11)$$

где  $y$  – координата по нормали к поверхности материала, м;

$l_1$  – длина пути перемешивания турбулентного потока, м.

Учитывая степенной характер распределения скорости в турбулентном пограничном слое, можно записать:

$$\frac{u}{U} = \left( \frac{y}{h} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (2.12)$$

Интенсивность турбулентных пульсаций можно выразить формулой:

$$I = \frac{\kappa u}{n}, \quad (2.13)$$

где  $n = 3 \div 7$  – характеристика наполненности профиля турбулентного пограничного слоя;  $\kappa = 0,4$  – постоянная Кармана (безразмерная);

$h$  – характерная толщина пограничного слоя, м;

$U$  – скорость потока воздуха вне пограничного слоя, м/с.

Подстановка в (2.3) выражений (2.4), (2.5), (2.10) и (2.13), а затем (2.10) и (2.12) приводит к следующему выражению для плотности потока эмиссии:

$$j = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dz} = K \frac{\rho_M I F_a}{F_f} = K \frac{\rho_M \cdot \kappa \cdot u(h_0) \cdot 3,2 \cdot \rho \cdot u(h_0)^2 \cdot \delta \cdot l \cdot \text{Re}^{-0,65}}{F_f \cdot n} =$$

$$\left[ K \cdot U_1 \cdot \frac{3,2 \cdot \kappa \cdot \rho \cdot \delta \cdot l}{F_f \cdot n} \cdot \left( \frac{\mu}{\rho \delta} \right)^2 \cdot (\text{Re}_1)^{2,35} \cdot \left( \frac{h_0}{h} \right)^{\frac{2,35}{n}} \right] \cdot \rho_M \cdot \left( \frac{U}{U_1} \right)^{2,35} \quad (2.14)$$

Здесь учтено, что согласно (2.5), (2.12):

$$u = u(h_0) = U(h_0/h)^{1/n},$$

$$\text{Re}^{-0,65} = \left( \frac{\rho \cdot u \cdot \delta}{\mu} \right) = \left( \frac{\rho \cdot U_1 \cdot \delta}{\mu} \frac{U}{U_1} \left( \frac{h_0}{h} \right)^{1/n} \right)^{-0,65} = (\text{Re}_1)^{-0,65} \left( \frac{U}{U_1} \right)^{-0,65} \left( \frac{h_0}{h} \right)^{-\frac{0,65}{n}}$$

$\text{Re}_1$  – номинальное число Рейнольдса, вычисленное по скорости  $U_1 = 1$  м/с:

$$\text{Re}_1 = \rho \cdot U_1 \cdot \delta / \mu. \quad (2.15)$$

Следовательно, уравнение (2.3) для плотности потока эмиссии волокон принимает вид:

$$j = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dz} = \chi \cdot \rho_M \cdot \left( \frac{U}{U_1} \right)^{2,35}, \quad (2.16)$$

где  $\chi$  – коэффициент эмиссии волокон, м/с, определяемый выражением:

$$\chi = K \cdot U_1 \cdot \frac{3,2 \cdot \kappa \cdot \rho \cdot \delta \cdot L}{F_f \cdot n} \cdot \left( \frac{\mu}{\rho \cdot \delta} \right)^2 \cdot (\text{Re}_1)^{2,35} \cdot \left( \frac{h_0}{h} \right)^{\frac{2,35}{n}}. \quad (2.17)$$

Уравнение (2.16) является уравнением эмиссии волокон. Оно имеет ясный, физически объяснимый вид, непосредственно показывающий пропорциональность потока эмиссии волокон скорости потока воздуха в степени 2,35. Коэффициент эмиссии волокон,  $\chi$  зависит от ряда факторов, среди которых можно выделить:

- физико-механические характеристики вещества, из которого сделаны волокна;
- относительные геометрические размеры волокон;

- коэффициент изгибной упругости волокон;
- коэффициент трения волокон друг о друга;
- характеристики связующего;
- относительную толщину приповерхностного слоя волокон, участвующих в эмиссии.

### **2.3 Оценка эмиссии волокон из волокнистых теплоизоляционных материалов на их теплозащитные свойства**

Влияние эмиссии волокон из волокнистых теплоизоляционных материалов будет существенно только в тех ограждающих конструкциях, где поверхность слоя утеплителя (минеральной ваты) обдувается струей воздуха. Основным тип таких ограждающих конструкций, широко используемый в современном строительстве – это навесные фасадные системы (НФС). Поэтому оценку изменения теплозащитных свойств волокнистых теплоизоляционных материалов целесообразно проводить на примере использования минераловатного утеплителя в НФС. При эксплуатации НФС в течение многих лет, происходит эмиссия волокон из теплоизоляционного слоя.

Уравнение (2.16) позволяет выполнить расчет суммарной эмиссии волокон с поверхности утеплителя за любой, наперед заданный срок,  $\Delta T$ , в том числе за срок службы НФС. Срок службы НФС обычно принимают  $\Delta T = 50$  лет [14, 15].

Вначале проводится расчет эмиссии волокон за один год. Такой расчет может проводиться двумя способами:

- оценкой максимальной эмиссии за год при максимально достижимой за год скорости движения воздуха в прослойке;
- суммированием эмиссии волокон при среднемесячных значениях скорости движения воздуха в прослойке.

В первом случае оценка суммарной эмиссии волокон с одного квадратного метра утеплителя за год выполняется по формуле:

$$(\Delta M)_{|z=1} = (365 \cdot 24 \cdot 3600) \cdot \chi \cdot \rho_M \cdot \left( \frac{v_{\max}}{U_1} \right)^{2,35}. \quad (2.18)$$

Во втором случае суммарная эмиссия волокон с одного квадратного метра утеплителя  $\Delta M|_{z=\Delta T}$  за год рассчитывается по формуле:

$$(\Delta M)|_{z=1} = (24 \cdot 3600) \cdot \chi \cdot \rho_M \cdot \sum_{i=1}^{12} \left( \left( \frac{U_i}{U_1} \right)^{2,35} \cdot z_i \right), \quad (2.19)$$

где  $\Delta M|_{z=1}$  – суммарная эмиссия волокон с одного квадратного метра утеплителя за год эксплуатации НФС, кг/м<sup>2</sup>год;

$z_i$  – продолжительность месяца в сутках.

Расчет по формуле (2.19) является более точным, однако оценка суммарной эмиссии волокон по (2.18) обладает большей надежностью.

Суммарная эмиссия волокон с одного квадратного метра утеплителя за срок эксплуатации фасада можно рассчитать по формуле:

$$(\Delta M)|_{z=\Delta T} = \Delta T \cdot (\Delta M)|_{z=1}. \quad (2.20)$$

Полученное значение суммарной эмиссии волокон за срок эксплуатации фасада позволяет рассчитать изменение сопротивления теплопередаче ограждения,  $\Delta R_o$ , м<sup>2</sup>·°C/Вт, к концу срока эксплуатации фасада вследствие изменения толщины слоя минеральной ваты по формуле:

$$\Delta R_o = \frac{\Delta \delta}{\lambda} = \frac{(\Delta M)|_{z=\Delta T}}{\rho_m \lambda}, \quad (2.21)$$

где  $\lambda$  – расчетная теплопроводность минеральной ваты, Вт/(м·°C).

В формуле (2.21) не учтена теплотехническая однородность конструкции. Фактически рассчитывается изменение сопротивления теплопередаче по глади конструкции. Для расчета изменения коэффициента теплопередачи конструкции используется формула для расчета приведенного сопротивления теплопередаче из [1], на основании которой получается формула для расчета изменения коэффициента теплопередачи:

$$\Delta K = - \left( \frac{1}{R_{o,1}^{np}} - \frac{1}{R_{o,2}^{np}} \right) \approx \frac{1}{R_{o,1} - \Delta R} - \frac{1}{R_{o,1}} = \frac{\Delta R}{(R_{o,1} - \Delta R) \cdot R_{o,1}} \approx \frac{\Delta R}{(R_{o,1})^2}. \quad (2.22)$$

Допустимость прогнозируемой эмиссии волокон за срок службы НФС, может быть определена на основании допустимого снижения сопротивления

теплопередаче конструкции за срок эксплуатации НФС. В качестве такого критерия предложено принимать допустимое повышение коэффициента теплопередачи стены с НФС на 5%. Такое повышение коэффициента теплопередачи на 5% выбрано из принимаемого при проектировании системы отопления запаса на авторегулирование. Тогда критерий допустимого повышения коэффициента теплопередачи стены с НФС записывается в виде:

$$\frac{\Delta K}{K} \leq 0,05. \quad (2.23)$$

Поскольку значение  $K$  для рассматриваемых конструкций составляет  $0,5 - 0,3$  Вт/м<sup>2</sup>·°С, то из (2.23) следует, что  $\Delta K \leq 0,025 \div 0,015$ , в среднем  $\Delta K \leq 0,020$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Отсюда и из (2.22) следует, что принятый критерий допустимого снижения  $\Delta R_o$  имеет вид:

$$\Delta R_o^{don} \leq 0,02 \cdot (R_{o,1})^2 \approx 0,2 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт}. \quad (2.24)$$

Т.е. при значении приведенного сопротивления теплопередаче конструкции равном примерно  $2 - 3$  м<sup>2</sup>·°С/Вт, допустимое снижение значения по глади конструкции составляет  $\Delta R_o^{don} = 0,2$  м<sup>2</sup>·°С/Вт.

Таким образом, проверка пригодности по эмиссии волокон из минераловатной плиты в НФС сводится к расчету значения  $\Delta R_o$ , м<sup>2</sup>·°С/Вт, по формуле (2.21) с последующей проверкой, что оно меньше или равно значению  $\Delta R_o^{don} = 0,2$  м<sup>2</sup>·°С/Вт.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМИССИИ ВОЛОКОН ПЛИТ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МИНЕРАЛОВАТНЫХ

#### 3.1 Подготовка к испытаниям. Искусственное состаривание образцов

На испытания было предоставлено 3 марки минераловатных теплоизоляционных изделий марок: IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА, IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ и IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА. Были подготовлены и испытаны по два образца каждой из плит. Размеры всех образцов составляли 250×250×50 мм. Средние плотности образцов, измеренные перед проведением исследований, представлены в таблице 3.1.

**Табл. 3.1** Плотности образцов испытанных марок минераловатных изделий

Марка изделия	Плотность, средняя по двум образцам, $\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>
IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА	83
IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ	73
IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА	71

На первом этапе проводилось искусственное состаривание образцов исследуемых материалов.

Образцы увлажняли до значений влажности до 10 % по массе, что в несколько раз превышало максимальную сорбционную влажность материалов. Затем образцы плотно заворачивали в полиэтиленовую пленку.

В таком состоянии образцы подвергались 100 циклам замораживания – оттаивания в климатической камере. Замораживание происходило в течение не менее 6 ч при температуре  $(-20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Оттаивание – в течение не менее 6 ч при температуре  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ .

После проведения циклов искусственного состаривания с образцов была удалена пленка, и они находились в комнатных условиях в течение недели. За это время они принимали влажность, соответствующую сорбционной влажности (не превышающую 1 % по массе).

Таким образом, образцы были искусственно состарены и подготовлены к проведению эксперимента для определения эмиссии волокон.

### **3.2 Определение эмиссии волокон в экспериментальной установке**

Эксперимент по определению эмиссии волокон из минераловатных изделий был начат 16 апреля и продолжался до 26 июля 2025 года.

Испытываемые образцы были помещены в короб экспериментальной установки (рис. 3.1) и закрыты сверху крышкой, после чего установка была включена (рис. 3.2). После 24 ч работы установки все исследуемые образцы были взвешены по четыре раза (второе взвешивание). Среднее значение массы каждого образца по четырем взвешиваниям было принято за начальную массу образца.



**Рис. 3.1** Образцы материалов в экспериментальной установке



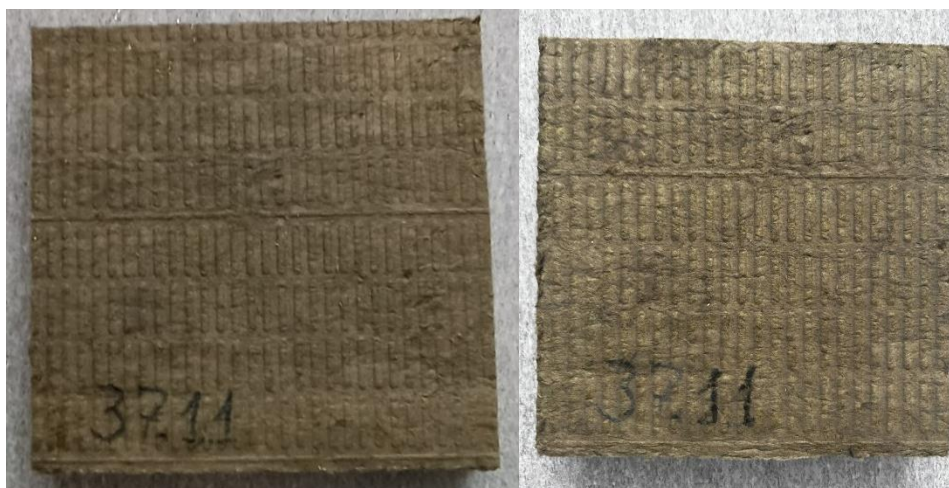


**Рис. 3.2** Экспериментальная установка в процессе испытаний

Средняя скорость обдува поверхности образцов в течение эксперимента была равной 18 м/с. Температура воздуха в помещении, где проводился эксперимент, составляла  $(22 \pm 2)$  °С. Относительная влажность воздуха –  $50 \div 65\%$ .

В процессе проведения эксперимента с интервалом в одну неделю проводились взвешивания образцов, а также измерение температуры и влажности воздуха в помещении.

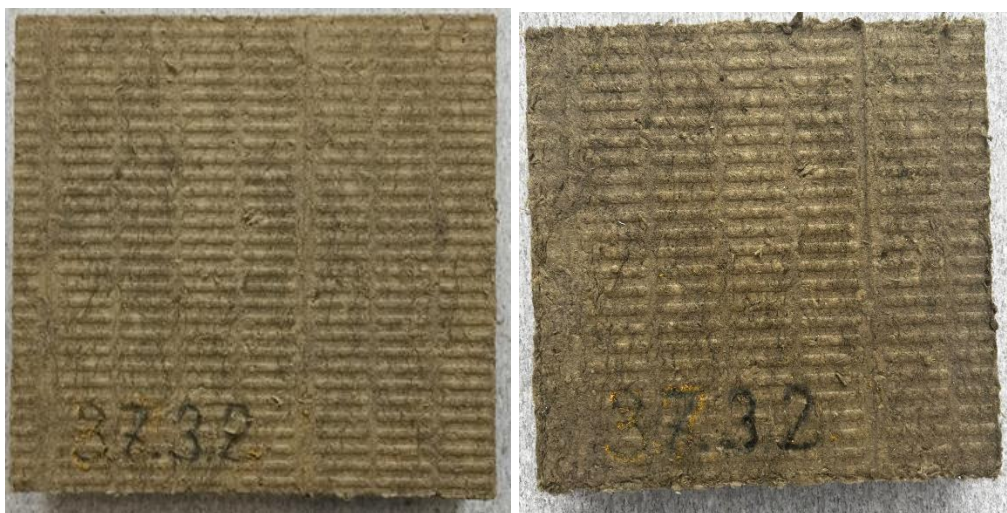
Вид образцов после 105 суток испытания на эмиссию волокон представлен на фото (3.3 – 3.5).



**Рис. 3.3** Вид образцов IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА до (слева) и после (справа) 105 суток испытаний в установке



**Рис. 3.4** Вид образцов IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ до (слева) и после (справа) 105 суток испытаний в установке



**Рис. 3.5** Вид образцов IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА до (слева) и после (справа) 105 суток испытаний в установке

По полученным экспериментальным данным изменения массы образцов вычислены значения абсолютного изменения массы образцов по формуле:

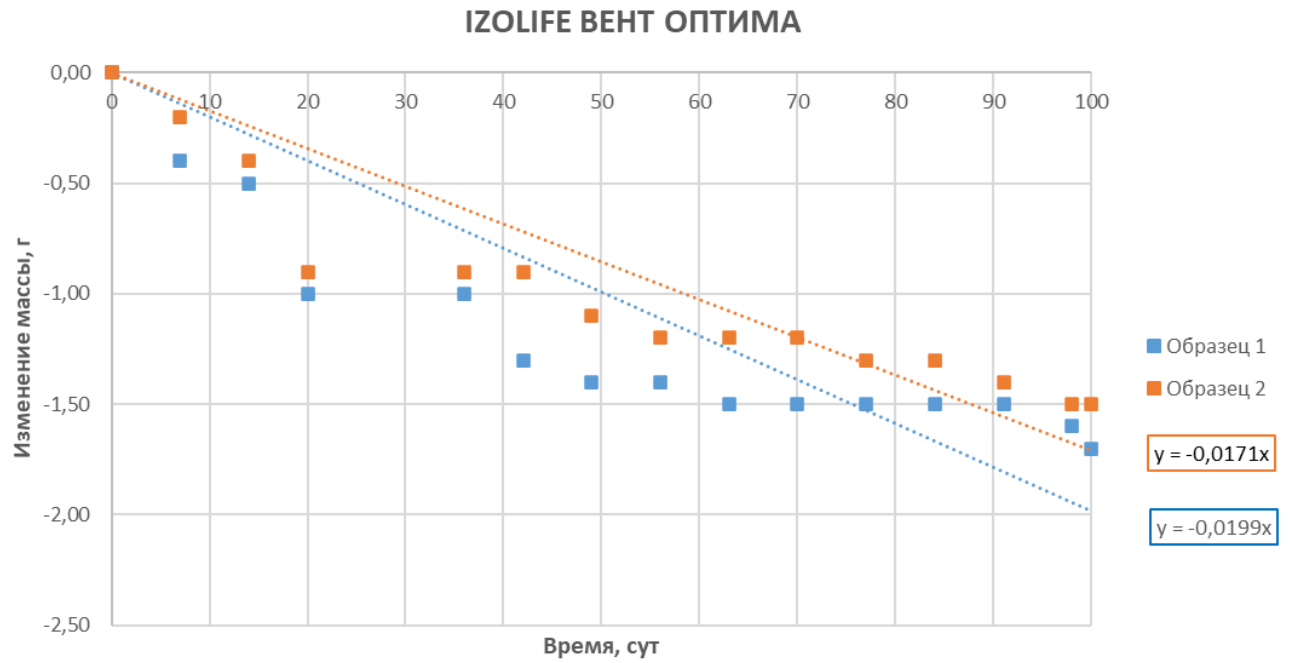
$$\Delta m = m - m_0, \quad (3.1)$$

где  $m$  – текущее значение массы образца, г;

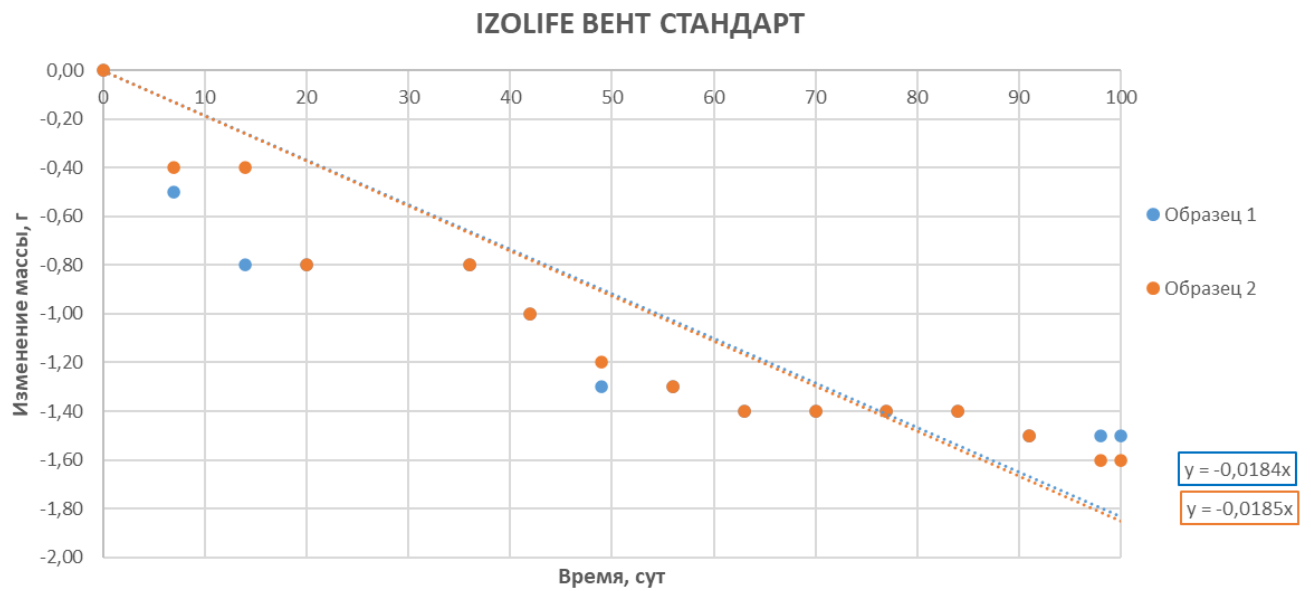
$m_0$  – начальная масса образца, принимаемая по результатам второго взвешивания, г.

Далее были рассчитаны скорости эмиссии волокон из образцов. Для этого значения абсолютного изменения масс образцов  $\Delta m$  наносились на плоскость координат в зависимости от времени  $z$ . Построение уравнений линейной регрессии для каждого образца приведены на рис. 3.6-3.9. Коэффициенты уравнений линейной

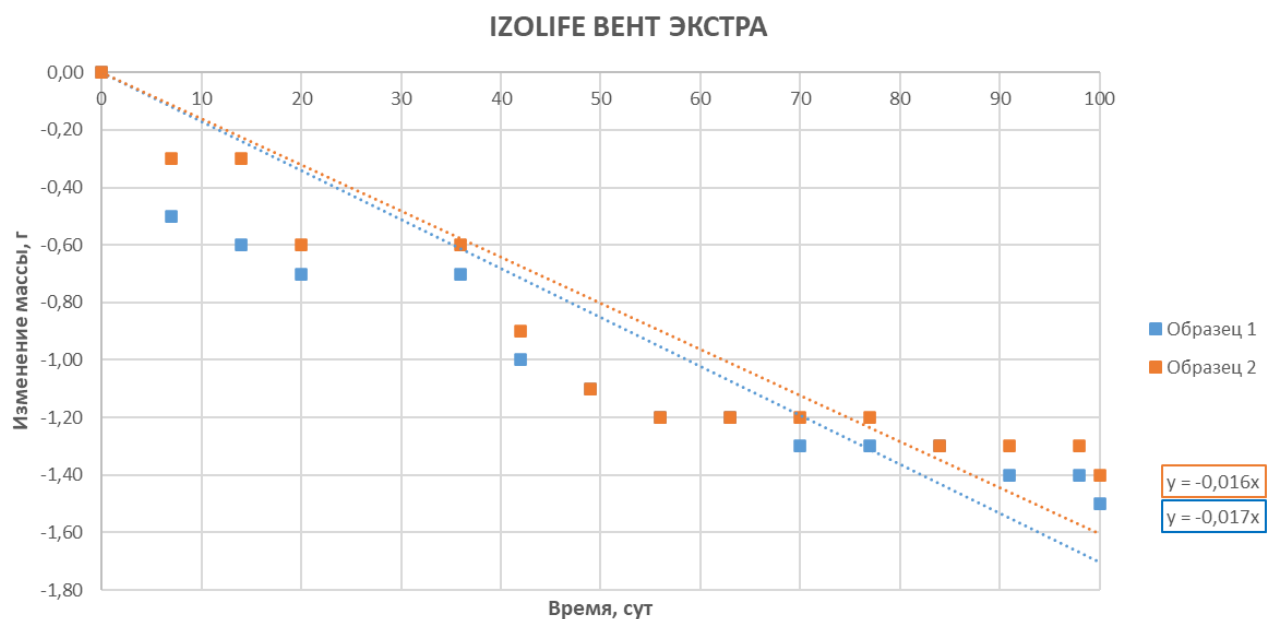
регрессии представляют собой скорости эмиссии волокон исследованных образцов. Значения скоростей эмиссии волокон представлены в таблице 3.1.



**Рис. 3.6** Абсолютное изменение массы образцов IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА в процессе испытаний



**Рис. 3.7** Абсолютное изменение массы образцов IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ в процессе испытаний



**Рис. 3.8** Абсолютное изменение массы образцов IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА в процессе испытаний

**Табл. 3.1** Определенные значения средних скоростей эмиссии волокон из образцов

Марка изделия	Плотность, средняя, кг/м <sup>3</sup>	№ образца	Скорость эмиссии волокон, $i$		Средняя скорость эмиссии волокон для марки, $i$ , 10 <sup>-10</sup> кг/с
			10 <sup>-10</sup> кг/с	г/сут	
IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА	83	1	2,30	0,020	2,14
		2	1,98	0,017	
IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ	73	1	2,13	0,018	2,14
		2	2,14	0,019	
IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА	71	1	1,85	0,016	1,91
		2	1,97	0,017	

#### 4. РАСЧЕТ ЭМИССИИ ВОЛОКОН ИЗ ПЛИТ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПРИ ВОЗМОЖНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В НАВЕСНОЙ ФАСАДНОЙ СИСТЕМЕ С ВЕНТИЛИРУЕМОЙ ПРОСЛОЙКОЙ

По данным таблицы 3.1 были вычислены коэффициенты эмиссии волокон для исследуемых марок. Расчет производился по формуле, выведенной из формулы (2.16):

$$\chi = \frac{i}{\frac{A \cdot \rho_m}{\left(\frac{U}{U_1}\right)^{2,35}}}, \quad (4.1)$$

где  $\chi$  – коэффициент эмиссии волокон, м/с;

$i$  – скорость эмиссии волокон, кг/с;

$A$  – площадь образца минераловатной плиты, м<sup>2</sup>;

$\rho_m$  – плотность образца минераловатной плиты, кг/м<sup>3</sup>;

$U$  – скорость потока воздуха, обдувающего образец, м/с;

$U_1$  – номинальная скорость потока воздуха, равная 1 м/с,

при следующих параметрах:  $A = 0,0625$  м<sup>2</sup>;  $U = 18$  м/с;  $\rho_m$  – согласно табл. 3.1;  $i$  – согласно последнему столбцу таблицы 3.1.

Результаты расчетов представлены в табл. 4.1

**Табл. 4.1** Коэффициент эмиссии волокон

Марка изделия	Коэффициент эмиссии волокон, $\chi$ , $10^{-14}$ м/с
IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА	4,63
IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ	5,26
IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА	4,83

Оценка суммарной эмиссии волокон с одного квадратного метра минераловатного изделия (при максимально достижимой за год скорости движения воздуха в прослойке) за год выполнялась по формуле (2.18).

Суммарная эмиссия волокон с одного квадратного метра минераловатной плиты за срок эксплуатации навесной фасадной системы рассчитывалась по формуле (2.20) с учетом того, что срок эксплуатации навесной фасадной системы принимался равным:  $\Delta T = 50$  лет.

Рассчитанные по формулам (2.18) и (2.20) суммарная эмиссия волокон с одного квадратного метра минераловатной плиты за 1 год и за 50 лет эксплуатации в навесной фасадной системе представлены в табл. 4.2.

**Табл. 4.2** Суммарная эмиссия волокон

Марка изделия	Суммарная эмиссия волокон за 1 год, $\Delta M_1$ , кг/м <sup>2</sup> (г/м <sup>2</sup> )	Суммарная эмиссия волокон за 50 лет, $\Delta M_{50}$ , кг/м <sup>2</sup> (г/м <sup>2</sup> )
IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА	$12,1 \cdot 10^{-5}$ (0,121)	$6,1 \cdot 10^{-3}$ (6,1)
IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ	$12,1 \cdot 10^{-5}$ (0,121)	$6,1 \cdot 10^{-3}$ (6,1)
IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА	$10,1 \cdot 10^{-5}$ (0,101)	$5,4 \cdot 10^{-3}$ (5,4)

Изменение сопротивления теплопередаче ограждения,  $\Delta R_o$ , (м<sup>2</sup>·°C)/Вт, к концу срока эксплуатации навесной фасадной системы вследствие изменения толщины минераловатной плиты рассчитывалось по формуле (2.21), и за 50 лет эксплуатации навесной фасадной системы при использовании исследуемых марок минераловатных плит составило менее 1% от требуемых значений сопротивления теплопередаче.



## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения научно-технической работы проведены экспериментальные исследования эмиссии волокон из плит теплоизоляционных минераловатных марок: IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА, IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ и IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА после искусственного состаривания образцов по методике ГОСТ Р 56732-2015 «Материалы и изделия теплоизоляционные. Методы определения характеристик эмиссии волокон при обдувании воздухом».

В результате проведенных исследований установлено, что суммарная эмиссия волокон с одного квадратного метра исследуемых марок минераловатных плит при возможном использовании в навесной фасадной системе с вентилируемой воздушной прослойкой при эксплуатации в течение 50 лет составила: IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА – 6,1 г, IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ – 6,1 г, IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА – 5,4 г. При этом изменение сопротивления теплопередаче ограждения за 50 лет эксплуатации навесной фасадной системы при использовании исследуемых марок минераловатных плит составляет менее 1% от требуемых значений сопротивления теплопередаче.

Проведенные расчеты эмиссии волокон изделий из минеральной ваты теплоизоляционных, применяемых в строительстве, марок: IZOLIFE ВЕНТ ОПТИМА, IZOLIFE ВЕНТ СТАНДАРТ и IZOLIFE ВЕНТ ЭКСТРА производства ООО «ВКТМ» подтверждают возможность использования исследованных марок минераловатных плит в навесной фасадной системе с вентилируемой воздушной прослойкой при ее эксплуатации в течение 50-ти лет без устройства ветрозащиты по поверхности исследованных минераловатных изделий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СП 50.13330.2024 «СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий»
2. Sedlbauer K., Künzel H.M. Luftkonvektions einflüsse auf den Wärmedurchgang von belüfteten Fassaden mit Mineralwolledämmung // WKSБ, 1999, Jg. 44, H.43.
3. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий. М., Стройиздат, 1984, 168 С.
4. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором // Журнал АВОК. 2004, №2 стр. 20-26, №3 стр. 20-26.
5. Гагарин В.Г. О некоторых теплотехнических ошибках, допускаемых при проектировании вентилируемых фасадов // Журнал АВОК. 2005, №2 стр. 52-58.
6. Бедаш С.Н., Борисов А.В., Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Козлов В.В., Петров Д.Н. Расчет аэродинамики и дождевого увлажнения стен высотных зданий // В кн. Тезисы докладов Научной конференции «Ломоносовские чтения». Секция механики. МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 2005 г., стр.37-38.
7. 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.
8. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Садчиков А.В., Мехнецов И.А. Продольная фильтрация воздуха в современных ограждающих конструкциях. Метод оценки теплозащиты стены здания с вентилируемым фасадом с учетом продольной фильтрации воздуха // Журнал АВОК. 2005, №8 стр. 60-70.
9. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Методика проверки выпадения конденсата в воздушном зазоре вентилируемого фасада // В кн. «Строительная физика в XXI веке». Научно-техническая конференция посвященная 50-летию НИИСФ РААСН. Москва, НИИСФ, 25-27 сентября 2006 г. с.73-80.
10. Гувернюк С.В., Синявин А.А. К расчету естественной конвекции в воздушной прослойке вентилируемого фасада с учетом щелевой проницаемости внешнего ограждения // В кн. «Строительная физика в XXI веке». Научно-техническая конференция посвященная 50-летию НИИСФ РААСН. Москва, НИИСФ, 25-27 сентября 2006 г.
11. Гувернюк С.В., Гагарин В.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий // Журнал АВОК. 2006, №8 стр. 18-24; 2007 №1 стр. 16-22.



12. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Лушин К.И., Пастушков П.П. О применении ветрогидрозащитных мембран в навесных фасадных системах с вентилируемой воздушной прослойкой // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 5. С. 128–131.
13. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Лушин К.И., Пастушков П.П. К вопросу о применении ветрогидрозащитных мембран в навесных фасадных системах с вентилируемой воздушной прослойкой // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 120–122.
14. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В. Математическая модель эмиссии волокон при обдуве воздушным потоком минераловатных изделий и ее использование при прогнозировании долговечности утеплителя вентилируемого фасада // РААСН, Вестник отделения строительных наук. Выпуск 13, том 2. М., 2009, стр. 135-142.
15. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Лушин К.И. Моделирование эмиссии волокон из минераловатного утеплителя навесной фасадной системы с вентилируемой прослойкой // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 29-31.
16. ГОСТ Р 56732-2015. «Материалы и изделия теплоизоляционные. Методы определения характеристик эмиссии волокон при обдувании воздухом» (с изменением № 1)
17. Пятницкий Л.Н. Уравнение Навье-Стокса и турбулентные пульсации. М. 2006. 190 с.
18. Чорин А.Дж. Завихренность и турбулентность. // В книге Проблемы турбулентности. Сборник переводных работ. С. 209 – 403.
19. Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Шаврин В.С., Носков А.С. Механика жидкости и газа. М. 2003. 462 с.
20. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука. 1974. 712 с.
21. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. М. – Ижевск. 2008. 250 с.
22. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М. Изд-во «НАУКА», 1975. – 847с.
23. Герберт Эртель мл. (ред.) Путеводитель Прандтля по гидроаэродинамике. М. – Ижевск. 2007. 776 с.