

УДК 692:[232.4]

ББК 38.5

К ПРОБЛЕМЕ ТЕРМООБНОВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

С. С. Шаумаров

кандидат технических наук, доцент

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Ташкент, Узбекистан

shoumarovss@gmail.com

Рассмотрен вопрос термического обновления объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Изучено физическое воздействие наружной среды на формирование внутреннего микроклимата помещений. Получено математическое выражение процесса взаимодействия ограждения с параметрами наружного и внутреннего воздуха. Предложен метод оценки остаточных теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий на железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: железнодорожные объекты, воздухопроницаемость, математическая модель, термическое обновление.

THE ISSUE OF THERMAL RENOVATION OF INFRASTRUCTURE OF RAILWAY TRANSPORT IS EVALUATED

S. S. Shaumarov

Ph.D. in Engineering, Associate Professor

Tashkent institute of railway engineers

Tashkent, Uzbekistan

shoumarovss@gmail.com

The physical impact of the external environment on the formation of the internal microclimate of premises is studied. The mathematical expression of the interaction process with the parameters of the fence outside and inside air is presented. A method for estimating the residual heat-shielding properties of the building envelope on the railways is offered.

Keywords: railroad facilities, air permeability, mathematical model, thermal upgrade.

Железнодорожный транспорт – одна из наиболее энергоемких областей народного хозяйства. В свете тенденций развития современного общества, важное значение приобретает решение проблемы снижения уровня энергопотребления, как самим подвижным составом, так и всеми объектами инфраструктуры железной дороги. Как показывает международный опыт, эксплуатация зданий вокзалов, железнодорожных гостиниц, многочисленных административных и бытовых зданий является достаточно затратной [Щипачева, 2013, с. 37]. Большое количество энергии (преимущественно электрической) расходуется на формирование благоприятного микроклимата помещений системами отопления, вентиляции и кондиционирования. Добиться сокращения энергозатрат можно не только за счет совершенствования самих систем климатизации, но и путем совершенствования конструкций (повышения уровня тепловой защиты) наружных ограждений зданий – стен, покрытия, оконных и дверных заполнений [Shaumarov, 2018, p. 105].

Особенно много проблем возникает в панельных зданиях железнодорожного транспорта, отличающихся весьма ненадежной теплоизоляцией наружных стен. Микроклимат в этих зданиях создает тяжелые условия для пребывания людей. Главным вопросом дальнейшей судьбы таких объектов является вопрос о целесообразности их сноса или обновления [Шаумаров, 2010, с. 241].

Вместе с тем, эти здания построены из долговечных материалов, обустроены всеми необходимыми видами инженерного оборудования. Большинство из них обладает запасами прочности и способны воспринимать нагрузку от надстраиваемых одного-двух этажей без усиления существующих несущих конструкций. В связи с этим, очень важным представляется вопрос о термическом обновлении эксплуатируемых зданий на железнодорожном транспорте за счет применения конструктивных решений дополнительного утепления наружных ограждений [Shaumarov, 2018, p. 368].

Оценка воздухопроницаемости наружных ограждений со сквозными дефектами, основанная на математическом моделировании

В решении вопроса о необходимости термического обновления с точки зрения энергетических затрат зданий должен быть использован комплексный подход, включающий обследование наружных ограждающих конструкций, соответствующие расчеты и разработку рациональной системы утепления ограждений [Шаумаров, 2018, с. 169].

Для корректной диагностики ограждающих конструкций, проверки соответствия их нормируемых параметров действующим в настоящее время нормативным документам, необходимо выполнение обстоятельного обследования здания с целью выявления степени износа ограждений. Проведение обязательных замеров в процессе обследования – это наиболее трудоемкая и экономически емкая операция, требующая для получения достоверных, репрезентативных данных объективизации процесса измерений [Шаумаров, 2017, с. 208]. Оперативное решение поставленных задач на современном уровне немыслимо без использования вычислительной техники и современных компьютерных технологий. Принимая это во внимание, свое исследование степени износа стеновых ограждающих конструкций, с точки зрения их теплозащитных свойств, мы выполняли с помощью математического моделирования процесса взаимодействия ограждения с параметрами наружного и внутреннего воздуха [Богословский, 1979, с. 248].

Ведущую роль при этом, особенно в свете физического износа зданий, играют вопросы фильтрации и инфильтрации через ограждения, объединенные общим понятием «воздухопроницаемость». Интенсивность фильтрации воздуха через ограждения зависит от градиента давления, вектор которого направлен от внешней стороны конструкции к внутренней, а также от пористости, наличия трещин и отверстий в конструкциях. Известны многочисленные работы, в которых вопросы инфильтрации воздуха через ограждающие конструкции рассматриваются в связи с наличием стыков между конструктивными элементами – стеновыми панелями, стенами и оконными или дверными блоками и т.д. [Беляев, 1985, с. 170]. Однако трещины и прочие сквозные дефекты ограждений в качестве причины их повышенной воздухопроницаемости мало исследованы. В работах [Беляев, 1985, с. 170] и [Фокин, 1973, с. 287] интенсивность фильтрации рассчитывалась экспериментально при обследовании ограждающих конструкций путем продувки воздуха через образцы материалов. Также известен и косвенный экспериментальный метод определения интенсивности фильтрации, основанный на термографии. Однако описание результатов такого обследования требует очень высокой квалификации исполнителя [Шишкин, 2004, с. 32].

Нами предлагается современный подход к оценке воздухопроницаемости наружных ограждающих конструкций, имеющих сквозные трещины, основанный на математическом моделировании происходящих физических процессов. Как известно, количественная оценка воздухопроницаемости основана на расчете инфильтрации наружного воздуха. В зависимости от учета конкретных параметров воздушной среды различают несколько методов ее расчета: нормативный; под действием ветрового давления; по воздухообмену, а также метод расчета инфильтрации, обусловленной тепловым потоком. Проанализировав указанные методы, был сделан вывод, что расчет инфильтрации по кратности воздухообмена оказывается предпочтительнее остальных по наибольшей сходимости результатов с экспериментальными

данными и по возможности обойтись без лабораторного оборудования. Он и был положен в основу построения математической модели данного физического процесса.

Рассматривалась трещина в наружной стене, проходящая в произвольном направлении (рис. 1). Течение воздуха в щели – следствие наличия градиента давления «внутренняя – наружная поверхность ограждения». Поток воздуха близок к ламинарному течению.

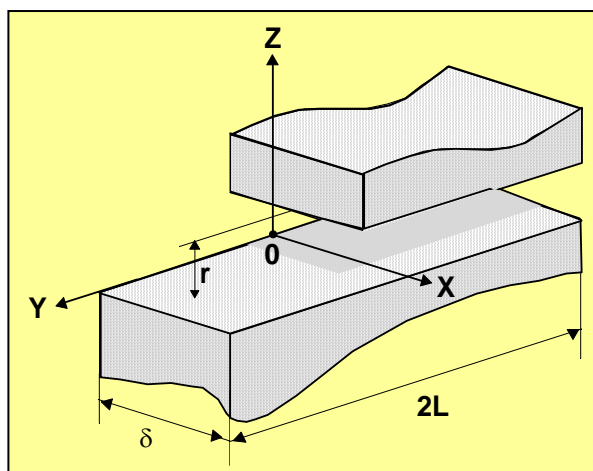


Рисунок 1 – Координатная привязка сквозной трещины в наружной стене.

Обозначения: δ – глубина трещины; L – длина трещины; r – ширина раскрытия трещины

Известно [Лаврентьев, 1977, с. 407], что движение воздуха, уподобленное движению несжимаемой жидкости, описывается уравнением Навье-Стокса, которое записывается в виде двух уравнений:

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0 \quad (\text{обычное условие несжимаемости}), \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} \equiv \frac{\partial V}{\partial t} + (\mathbf{V}, \nabla) \cdot V = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} P + \nu \Delta V, \quad (\text{уравнение движения}) \quad (2)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа.

Использование уравнения (2) применительно к движению воздуха согласно рис. 1, требует в качестве исходных параметров для расчета скорости и расхода воздуха задание геометрических параметров области и ее участков, а также градиента давления. Применительно к плоским струям уравнение (2), с заменой кинематической вязкости ν на динамическую вязкость η , и уравнение неразрывности можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right), & (3) \\ \frac{\partial P}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right), & (4) \\ \frac{\partial P}{\partial z} &= 0, & (5) \\ \frac{d\rho}{d\tau} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} - M &= 0, & (6) \end{aligned} \right\}$$

где P [Па] – перепад давления между внутренней и наружной поверхностями ограждения; u, v, w – проекции скорости воздуха (среды) на оси x, y, z [м/с]; ρ [кг/м³] – плотность воздуха; τ [с] – время; M [кг/(м³·с)] – массовый расход воздуха в единицу времени в единице объема, занимаемого трещиной; η [Н·с/м²] – динамическая вязкость воздуха; r – ширина раскрытия трещины.

Граничные условия для системы уравнений (3) – (6) запишем в виде:
при $z = 0$ и $z = r$

$$u = v = w = 0 \quad (7)$$

Значения скоростей воздуха u, v вдоль осей X и Y определим в результате интегрирования по z уравнений (3) и (4) вычислением констант интегрирования и с учетом граничного условия (7):

$$u = -\frac{1}{2\eta}(r-z) \cdot z \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (8)$$

$$v = -\frac{1}{2\eta}(r-z) \cdot z \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (9)$$

Далее, представим уравнение неразрывности (6) в интегральной форме:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = -C, \quad (10)$$

$$\text{где } C = \frac{12 \cdot M \cdot \eta}{r^2 \cdot \rho}.$$

Уравнение (10) относится к классу диффузионных задач, описываемых уравнением Пуассона [Фарлоу, 1985, с. 383]. Его удобнее рассматривать в форме безразмерных величин. Для этого достаточно подобрать соответствующий масштаб путем ввода относительных переменных x' и y' . Выполним замену переменных, положив:

$$x' = \frac{x}{A \cdot L}, y' = \frac{y}{L}, \text{ где } A = \frac{\delta}{L}. \quad (11)$$

где δ – глубина трещины; L – длина трещины.

Таким образом, ниже рассматривается относительная система координат $Ox' y'$, в которой массовый расход воздуха M [кг/(м³·с)], занимаемый трещиной, заменим объемным расходом воздуха Q [м³/с], поступающего в щель в единицу времени, по формуле:

$$Q = \frac{M \cdot A \cdot L^2 \cdot r}{\rho}. \quad (12)$$

Введем обозначения:

$$\mathfrak{R} = \frac{r^3 \cdot L^2 \cdot A}{12 \cdot Q \cdot \eta} \quad \text{и} \quad P \cdot \mathfrak{R} = P'. \quad (13)$$

Тогда, уравнение Пуассона (10) с учетом (13) для P' , в относительной системе координат, будет иметь вид:

$$\frac{\partial^2 P'}{\partial (x' \cdot A)^2} + \frac{\partial^2 P'}{\partial y'^2} = -1. \quad (14)$$

Для дальнейшего удобства записи положим $x' \cdot A = X'$, тогда (10) окончательно запишется как

$$\frac{\partial^2 P'}{\partial X'^2} + \frac{\partial^2 P'}{\partial y'^2} = -1. \quad (15)$$

Полученное уравнение (15) было решено при помощи метода Галёркина [Ректорис, 1985, с. 589]. А затем, путем обратных преобразований – перехода

от относительных координат к исходным, была получена зависимость расхода воздуха Q через трещину от ее размеров $\{r, L, \delta\}$ и перепада давления P с наружной и внутренней сторон ограждения:

$$Q = \frac{P \cdot r^3}{12\eta \cdot L \cdot \delta \cdot \xi}, \quad (16)$$

где

$$\xi = \frac{64}{\pi^4} \cdot \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \frac{(-1)^{\binom{k+l}{2}-1} \cdot (-1)^{\binom{k+1}{2}-1} \cdot (-1)^{\binom{l+1}{2}-1}}{k^3 l + l^3 k}$$

– эмпирический коэффициент, зависящий от количества учтенных при решении уравнения (15) членов тригонометрического ряда базисных функций.

По результатам численных расчетов была построена зависимость изменения расхода воздуха от перепада давления ΔP на внутренней и внешней поверхности ограждения в диапазоне от 0 до 100 Па и величины раскрытия трещины γ от 0 до 10 мм (рис. 2).

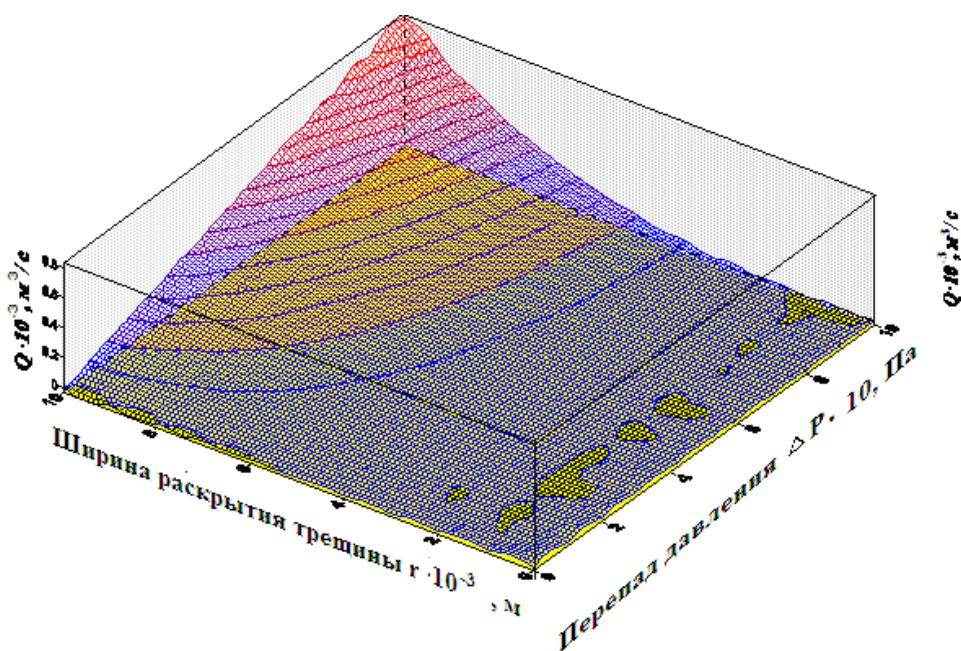


Рисунок 2 – Поверхность объемного расхода воздуха, как функция перепада давления на наружной и внутренней поверхности ограждения и величины раскрытия трещины

Примечание: локальные максимумы в зоне минимальных значений величины Q – «издержки» процедуры интерполяции и ошибок округления.

Анализ представленной поверхности Q показывает, что при ширине раскрытия трещины $r < 1$ мм расход воздуха через щель не имеет существенного значения для формирования микроклимата помещений. Здесь часть поверхности параллельна основанию, а величина воздухообмена соизмерима с таковой для пор материала ограждения. При дальнейшем увеличении ширины раскрытия трещины r расход воздуха резко возрастает, что проявляется в форме поверхности, принимающей параболический характер ($1\text{ мм} < r \leq 3\text{ мм}$). При $r > 3$ мм начинается повышенная инфильтрация воздуха.

Заключение. Полученное нами уравнение (16) и разработанный на его основе программный комплекс позволили значительно упростить оценку остаточных теплозащитных свойств ограждающих конструкций [Shaumarov, 2016, p. 532].

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработан методологический подход к проблеме термического обновления объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта для климатических условий Республики Узбекистан, основанный на получении объективных данных об остаточных теплозащитных свойствах ограждений.

Используя предлагаемую методику оценки фактического расчетного сопротивления ограждения с трещиной, можно повысить точность определения расхода тепловой энергии на отопление здания и сооружений железнодорожного транспорта при проведении его энергетического аудита.

Библиографический список

1. *Беляев В. С.* Теплопередача в узлах ограждающих конструкций при двухмерной фильтрации наружного воздуха. М.: НИИСФ, 1985. 170 с.
2. *Богословский В. Н.* Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. 248 с.
3. *Лаврентьев М. А.* Проблемы гидродинамики и их математические модели / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. М.: Наука, 1977. 407 с.

4. *Ректорис К.* Вариационные методы в математической физике и технике. М.: Мир, 1985. 589 с.
5. *Фарлоу С.* Уравнения с частными производными. М.: Мир, 1985. 383 с.
6. *Фокин К. Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 1973. 287 с.
7. *Шаумаров С. С.* Информационно-техническая диагностика технического состояния эксплуатируемых зданий // II Международная научно-практическая конференция «Экономика и право: становление, развитие, трансформация». 2017. С. 204-208.
8. *Шаумаров С. С.* Комплексный подход к проблеме термообновления стен панельных зданий / С. С. Шаумаров, Ю. А. Щипачева /// VII Междунар. науч.-практич. конф. «TRANS-МЕСН-ART-СЕМ» Тр.– Москва: МИИТ, 2010. С. 239-241.
9. *Шаумаров С. С.* Перспективы дальнейшей эксплуатации панельных жилых зданий / С. С. Шаумаров, Е. В. Щипачева, Р. Х. Пирматов // Материалы 12-й Международной научно-практической конференции «Перспективы развития строительных технологий» / Днепрпетровск, 2018. С. 165-169
10. *Шишкин А. В.* Инспекция теплозащитных свойств оболочек зданий / А. В. Шишкин // Жилищное строительство, №9. 2004. С. 17-32.
11. *Щипачева Е. В.* К вопросу повышения энергоэффективности зданий на железнодорожном транспорте / Е. В. Щипачева, С. С. Шаумаров // Труды международной научно-практической конференции «Транспорт-2013». 2013. С. 35-37.
12. *Shaumarov S. S.* On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport // VIII International Conference “Transport Problems – 2016”. Katowice, Poland. 2016. P. 522-532.
13. *Shaumarov S. S.* On peculiarities of formation of the thermal mode in operating panel buildings / S. S. Shaumarov, A. I. Adilhodzhayev, F. F. Karimova // International conference «Science and practice: a new level of integration in the modern world» / London, 2018. P. 365-368.
14. *Shaumarov S. S.* On the method of estimation of thermal protective properties of external walls of operating residential buildings / S. S. Shaumarov, A. I. Adilhodzhayev, S. I. Kandakharov // International conference «Student science: research works» / March 30, 2018. San Francisco, California, USA. Part II. «B & M Publishing». P. 103-106.

References

1. *Belaev V. S.* Heat transfer in knots of protecting designs at a two-dimensional filtration of external air. М.: NIICF, 1985. 170 p. (In Russian).

2. *Bogoslovskiy V. N.* Thermal mode of buildings. M.: Stroyizdat, 1979. 248 p. (In Russian).
3. *Lavrentiev M. A.* Problems of hydrodynamics and their mathematical models / M. A. Lavrentiev, B. V. Shabat M.: Science, 1977. 407 p. (In Russian).
4. *Rektoris K.* Variation methods in the mathematical physics and the technician M.: Mir, 1985. 589 p. (In Russian).
5. *Farlou S.* The equations with private derivatives. For science officers and engineers M.: Mir, 1985. 383 p. (In Russian).
6. *Fokin K. F.* Building the heating engineer of protecting parts of buildings / M.: Stroyizdat, 1973. 287 p. (In Russian).
7. *Shishkin A. V.* Inspection of heat-shielding properties of covers of buildings / A. V. Shishkin // Housing construction, №9, 2004, P. 17-32. (In Russian).
8. *Shaumarov S. S.* Complex approach to the problem of walls of panel buildings / S. S. Shaumarov, E. A. Shchipacheva // VII International theoretical and practical conference «TRANS-MECH-ART-CHEM» / Moscow.: MIIT, 2010. p. 239-241. (In Russian).
9. *Shaumarov S. S.* Information and technical diagnostics of technical condition of operated buildings / S. S. Shaumarov // II International Scientific and Practical Conference "Economics and Law: Formation, Development, Transformation" / Rostov. 2017. C. 204-208. (In Russian).
10. *Shaumarov S. S.* Prospects for further operation of panel residential buildings / S. S. Shaumarov, E. V. Shchipacheva, R. Kh. Pirmatov // Materials of the 12th International Scientific and Practical Conference "Prospects for the Development of Construction Technologies" / Dnepropetrovsk. 2018. C. 165-169. (In Russian).
11. *Shchipacheva E. V.* To the issue of increasing the energy efficiency of buildings in railway transport / E.V. Shchipacheva, S.S. Shamarov // Materials of the International Scientific and Practical Conference "Transport-2013" / Rostov State Transport University. 2013. p. 35-37. (In Russian).
12. *Shaumarov S. S.* On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport / Shaumarov S.S. // VIII International Conference "Transport Problems – 2016" / Katowice, Poland. 2016. p. 522-532. (in English)
13. *Shaumarov S. S.* On peculiarities of formation of the thermal mode in operating panel buildings / International conference «Science and practice: a new level of integration in the modern world» / Shaumarov S. S., Adilhodzhayev A. I., Karimova F. F. // April 27, 2018. London. p. 365-368. (in English)

14. *Shaumarov S. S.* On the method of estimation of thermal protective properties of external walls of operating residential buildings / S. S. Shaumarov, A. I. Adilhodzhayev, S. I. Kandakharov // International conference «Student science: research works» / March 30, 2018. San Francisco, California, USA. Part II. «B & M Publishing». 2018. p. 103-106. (in English)