

ВЛИЯНИЕ ОТКАЗА РАБОТЫ ОБЛИЦОВОЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ НА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАВЕСНЫХ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Шуршилин¹ Е.А., Олехнович² Я.А.¹ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29,²ФГАОУ ВО «Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, ул.
Политехническая, 29,
e-mail: ¹shurshilin.ea@edu.spbstu.ru, ²olehnovich_yaa@spbstu.ru

Аннотация: Одним из наиболее распространенных решений для наружных ограждающих стеновых конструкций являются навесные вентилируемые фасадные конструкции, которые благодаря использованию воздушных прослоек обеспечивают повышенную энергоэффективность. Однако такие системы имеют ряд недостатков, включая образование мостиков холода в местах крепления фасадных панелей, что может привести к значительным проблемам в работе системы. Кроме того, известно, что отдельные фасадные панели могут падать и отказывать в работе, что приводит к нарушению замкнутости воздушной прослойки и негативно влияет на теплотехнические свойства конструкции. Поэтому необходимо учитывать как недостатки самой конструкции фасада, так и проблемы, связанные с его эксплуатацией, чтобы правильно оценить влияние отказа работы фасадных панелей на теплотехнические свойства конструкции в целом. Эта проблема является одной из важнейших для систем навесных вентилируемых фасадов, так как может привести к полной потере теплотехнических свойств конструкции. В данном исследовании рассматривается теоретическое решение задачи по расчёту сопротивления теплопередаче воздушных прослоек в навесных вентилируемых фасадных конструкциях и организация этого решения в последовательную расчётную методику для дальнейшего исследования влияния падения облицовочных панелей на теплотехнические свойства навесных вентилируемых фасадов. Основным вопросом исследования, состоящий в оценке влияния отказа работы облицовочных панелей на теплотехнические свойства навесных вентилируемых фасадных конструкций, рассматривается согласно положениям разработанной методики и последующего её математического анализа. Необходимость такого исследования обосновывается потребностью в определении наиболее эффективных способов устранения недостатков навесных вентилируемых фасадных конструкций и повышения их теплотехнических свойств.

Материалы и методы: анализ научно-технической литературы, математический анализ зависимости сопротивления теплопередаче воздушных прослоек от геометрических параметров сооружения.

Предмет исследования: воздушные прослойки в навесных вентилируемых фасадных конструкциях.

Результаты: получены математические зависимости, позволяющие оценить изменение влажности материала теплоизоляции навесных фасадных систем, скорости воздуха в воздушной прослойке и температуры воздуха в воздушной прослойке при отказе работы облицовочных панелей.

Выводы: отказ работы облицовочных панелей навесных фасадных систем приводит к изменению влажности теплоизоляции и параметров воздушной прослойки, что может привести к превышению нормативных требований.

Ключевые слова: энергоэффективность зданий и сооружений, навесные вентилируемые фасады, наружные ограждающие конструкции зданий и сооружений, теплотехнический расчёт зданий и сооружений, замкнутость воздушных прослоек.

ВВЕДЕНИЕ

Фасадные конструкции с вентилируемыми воздушными прослойками являются одним из самых популярных конструктивных решений наружных ограждающих конструкций (стен). Благодаря использованию воздушных прослоек существенно повышаются её энергоэффективность за счёт работы воздуха в замкнутой прослойке как эффективного теплоизолирующего материала. Тем не менее, несмотря на эффективность таких систем, в их конструкции существуют существенные недостатки. Одной из уже отмеченных и признанных крупных уязвимостей является образование мостиков холода в местах крепления фасадных панелей к конструкции с помощью дюбелей. Доказано, что такие системы сами по себе являются теплотехнически неоднородными, для чего в СП 50.13330 «Тепловая защита зданий» введён специальный коэффициент теплотехнической неоднородности, учитывающий

граничные условия и недостатки работы вентилируемых фасадов. Однако помимо учёта недостатков самой конструкции фасада, необходимо учитывать недостатки, проявляющиеся во время эксплуатации фасадных панелей. Так, известна проблема падения и отказа работы отдельных панелей вентилируемого фасада. Несмотря на возможность быстрой их замены, нельзя не учитывать определённые проблемы технологических процессов этой операции, потому реальное время замены отпавших панелей может занять время куда большее, чем заявленное теоретическое время замены. Следовательно, нельзя не учитывать влияние отказа работы отдельных фасадных панелей на теплотехнические свойства конструкции, потому как на определенное, достаточно длительное время, воздушная прослойка вентилируемого фасада теряет свою замкнутость и последствия для всей конструкции могут быть необратимы, поэтому существует актуальная проблема оценки влияния отказа работы фасадных

панелей на теплотехнические свойства конструкции вентилируемого фасада в целом.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Современная строительная теплофизика полностью описывает процессы теплопередачи в ограждающих конструкциях с вентилируемыми воздушными прослойками. Научные исследования и работы, посвященные теплофизическим свойствам вентилируемых фасадов, в большинстве своем направлены на поиск конструктивных уязвимостей таких систем. Например, существенное количество научных работ посвящено изучению т. н. «мостиков холода», создаваемых элементами крепления фасадных панелей к внутреннему пирогу стены (кронштейнами). Однако малоизученным остается вопрос влияния отказа фасадных панелей на теплофизику всей фасадной системы. Практическая ценность существующей научно-технической литературы для данного исследования состоит в использовании имеющегося теоретического и практического базиса для решения поставленной проблемы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый этап исследования заключается в изложении существующих математических моделей теплопередачи в ограждающих конструкциях, что позволит совместить уже имеющиеся данные и на их основе проанализировать отказ работы фасадных панелей с точки зрения теплофизических свойств целой конструкции вентилируемого фасада. Второй этап исследования состоит в получении конкретных математических зависимостей, описывающих поведение вентилируемых фасадных систем в случае отказа отдельных панелей.

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Под отказом работы облицовочной панели НФС будем понимать ситуацию, в которой по тем или иным причинам крепление облицовочной панели к остальным слоям конструкции нарушается и панель отпадает от конструкции (см рис. 1.). Параметры b и h на рисунке 1 – геометрические параметры облицовочной панели.

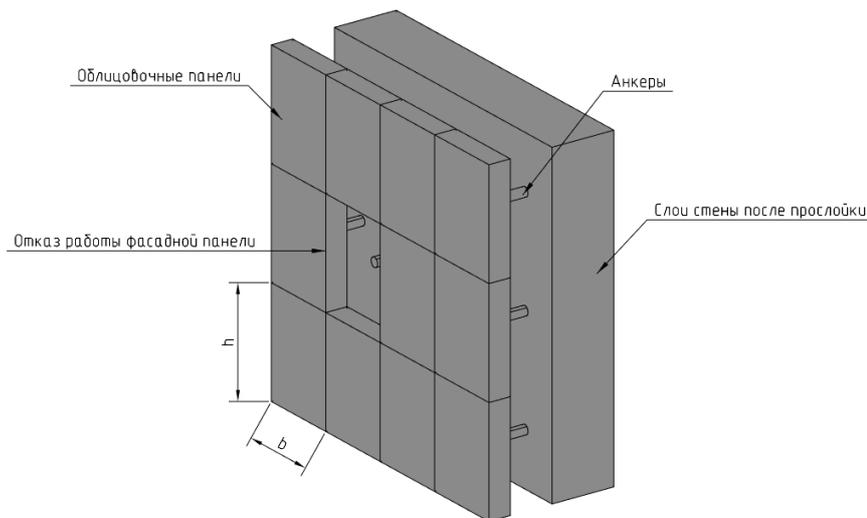


Рис. 1. Схема НФС после отказа работы фасадной панели
Fig. 1. The scheme of the NFS after the failure of the facade panel

Из рис. 1 очевидно, что поставленная задача сводится к рассмотрению влияния возникающей в конструкции брешки габаритами $b \times h$. Ключевыми факторами здесь являются температурный и влажностный режим конструкции.

Одномерное температурное поле многослойной ограждающей конструкции

В общем случае, любая стеновая ограждающая конструкция является набором i числа слоёв, обладающих собственными показателями сопротивления теплопередачи R_i , которые в сумме и составляют собой сопротивление теплопередаче конструкции R_0 . Сопротивление теплопередаче есть

отношение толщины слоя δ к теплопроводности материала λ :

$$R = \frac{\delta}{\lambda}; \quad (1)$$

При этом следует отметить, что воздушная прослойка в ограждающей конструкции обладает отличными от других слоёв конструкции теплофизическими свойствами и, соответственно, имеет смысл выделять сопротивление теплопередачи воздушной прослойки $R_{в.п.}$ в отдельную переменную, так как совершенно очевидно, что сопротивление теплопередаче воздушной прослойки нельзя описывать идентично

сопротивлениям теплопередачи твердотельных слоёв конструкции. Учитывая теплообмен, происходящий на внутренней (R_e) и наружной (R_n) поверхностях конструкции, сопротивление теплопередаче конструкции описывается как:

$$R_0 = R_e + \sum R_i + R_{e.n.} + R_n; \quad (2)$$

Распределение температуры (температурное поле) в ограждающей конструкции определяется по формуле:

$$t_x = t_e - \frac{R_{e-x}}{R_0} (t_e - t_n); \quad (3)$$

Графическая интерпретация выражения (3) представлена на рисунке 2.

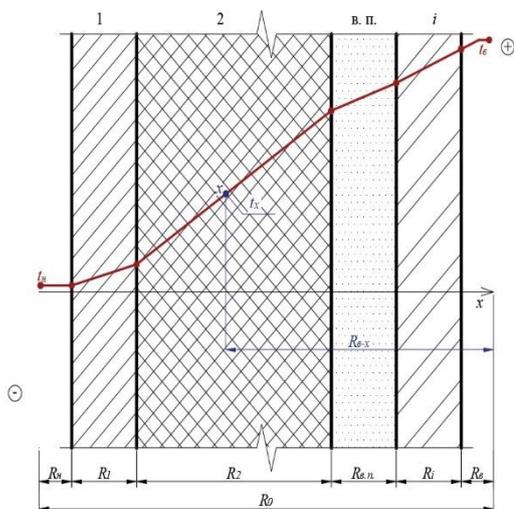


Рис. 2. Одномерное температурное поле многослойной ограждающей конструкции [1]

Fig. 2. One-dimensional temperature field of a multilayer enclosing structure

Термическое сопротивление воздушной прослойки в навесной фасадной системе

Для понимания влияния отказа работы фасадных панелей на теплотехнические свойства фасадных конструкций необходимо рассмотреть вопрос теплофизического расчета навесных фасадных систем.

$$R_{e.n.} = \frac{1}{\alpha_{e.n.}}, \quad (4)$$

где $\alpha_{e.n.}$ - коэффициент теплообмена в прослойке, согласно приложению Л СП 50.13330.2012 определяется как:

$$\alpha_{e.n.} = \alpha_{np} = \alpha_k + 2\alpha_l, \text{ где} \quad (5)$$

α_k - конвективный коэффициент теплоотдачи;

α_l - лучистый коэффициент теплоотдачи;

Конвективный коэффициент теплоотдачи определяется по формуле Л.7 СП 50.13330.2012:

$$\alpha_k = 7,34 \cdot (V_{np})^{0,656} + 3,78 \cdot \exp(-1,91 \cdot V_{np}), \quad (6)$$

где

V_{np} - скорость воздуха в воздушной прослойке, определяемый согласно формуле Л.2 СП 50.13330.2012:

$$V_{np} = \sqrt{\frac{K(K_n - K_z)V_n^2 + 0,08h(t_{np} - t_n)}{\sum_j \xi_j}}, \text{ где} \quad (7)$$

K_n, K_z - аэродинамические коэффициенты на разных стенах здания, определяются по СП 20.13330 «Нагрузки и воздействия»;

V_n - скорость движения наружного воздуха;

K - коэффициент учета скорости потока по высоте;

h - наибольшая высота непрерывной воздушной прослойки;

t_{np} и t_n - средняя температура воздуха в прослойке и температура наружного воздуха соответственно;

$\sum_j \xi_j$ - суммарный коэффициент местного сопротивления, определяемый по формуле:

$$\sum_j \xi_j = 1,2 \cdot \left(\frac{S_{np}}{S_{ex}}\right)^2 + 0,04 \cdot \frac{h}{2\delta_{np}} + 1,2 \cdot \left(\frac{S_{np}}{S_{вых}}\right)^2, \quad (8)$$

где

S_{np} - площадь сечения воздушной прослойки на один погонный метр стены;

S_{ex} и $S_{вых}$ - площади входного и выходного отверстий, приходящиеся на один погонный метр стены;

δ_{np} - толщина воздушной прослойки.

Лучистый коэффициент теплообмена определяется по формуле:

$$\alpha_l = \frac{m}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}}, \text{ где} \quad (9)$$

C_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,77 Вт/(м²К⁴);

C_1 и C_2 - коэффициенты излучения поверхностей перед прослойкой и после прослойки соответственно, принимаются по приложению Л СП 50.13330.2012;

m - температурный коэффициент, определяемый по формуле:

$$m = 0,04 \cdot \left(\frac{273 + t_{np}}{100}\right)^3; \quad (10)$$

Согласно СП 50.13330.2012 температурный коэффициент определяется один раз для температуры на 1 °С большей, чем температура наружного воздуха ввиду его малого изменения при варьировании температуры прослойки, потому

коэффициент лучистого теплообмена, очевидно, является такой же постоянной величиной. Таким образом, можно заключить, что ключевыми параметрами для определения термического сопротивления навесного вентилируемого фасада с учетом прослойки являются скорость и температура воздуха в прослойке.

При расположении приточных и вытяжных каналов навесной фасадной системы на одной стене аэродинамические коэффициенты принимаются равными, и формула упрощается (формула Л.3 СП 50.13330.2012):

$$V_{np} = \sqrt{\frac{0,08h(t_{np} - t_n)}{\sum_j \xi_j}}; \quad (11)$$

Средняя температура воздуха в прослойке определяется по формуле Л.4 СП 50.13330 и равна соответственно:

$$t_{np} = t_0 - (t_0 - t_n) \cdot \frac{x_0}{h} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{x_0}\right) \right], \text{ где} \quad (12)$$

$$t_0 = \frac{\frac{t_e}{R_e} + \frac{t_n}{R_n}}{\frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_n}} \quad (13)$$

- предельная температура воздуха в прослойке;

$$x_0 = \frac{c_e V_{np} \delta_{np} \rho_e}{\frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_n}} \quad (14)$$

- такая высота, при которой средняя температура воздуха в прослойке отличается от предельной ровно в e раз.

Согласно СП 345.1325800.2017 значение скорости воздуха в прослойке можно рассчитать приближенно по формуле:

$$\tilde{V}_{np} = \sqrt{\frac{0,08h}{\sum_j \xi_j} \cdot \sqrt{\frac{R_n}{R_e}} \cdot (t_n - t_e)}; \quad (15)$$

Описанные зависимости позволяют произвести расчет температурного и влажностного режима навесной фасадной конструкции и провести проверки на соответствие нормативным требованиям. В рамках методики СП 50.13330.2012 также подразумевается проверка НФС на переувлажнение материала утеплителя на величину предельного приращения влажности утеплителя $\Delta w, \%$.

Изменение влажности материала при отказе работы облицовочной панели

Очевидно, что при отказе работы фасадной панели возникает существенное изменение температуры воздуха внутри прослойки. Так, в непосредственно зоне отказа панели температура воздуха изменится до температуры наружного воздуха t_n . Докажем, что это будет иметь влияние на влажность материала теплоизоляции и, следовательно, на его теплофизические свойства. Влажность материала можно определить как:

$$w = U \cdot \frac{\rho_m}{\rho_{ж}}, \text{ где} \quad (16)$$

ρ_m и $\rho_{ж}$ - плотность материала и плотность воды соответственно;

U - влагосодержание материала, определяется по формуле:

$$U(t) = U(t = 20^\circ\text{C}, \varphi) \times \left[1 - 0,002 \cdot (t - 20) \cdot e^{2,8} \cdot (1 - \varphi) \right] \quad (17)$$

где $U(t = 20^\circ\text{C}, \varphi)$ - влагосодержание материала при температуре воздуха 20°C и влажности наружного воздуха φ .

t - температура воздуха, для которой ведется расчёт;

В контексте эксплуатации зданий и сооружений процессы влагопереноса происходят нелинейно и могут быть описаны как изотермический влагоперенос в неограниченной пластине толщиной δ . Тогда влагосодержание материала является функцией времени τ . Практический смысл времени τ заключается в рамках данной задачи в промежутке времени между моментом отказа работы облицовочной панели и её последующей замены. Среднее значение влагосодержания по толщине изоляции во времени описывается выражением:

$$u_v(\tau) = \theta \cdot [u_v(x = \delta) - u_v(\tau = 0)] + u_v(\tau = 0), \text{ где}$$

$u_v(x = \delta) = U(t)$ - влагосодержание материала на поверхности контакта с воздухом. В контексте поставленной задачи является функцией температуры воздуха;

$$u_v(\tau = 0) = U(t = t_{нач}) = U_{нач} = const$$

- влагосодержание материала в нулевой момент времени τ . В контексте задачи эту величину можно трактовать как влагосодержание материала утеплителя до отказа работы фасадной панели;

$$\theta = 1 - \frac{8}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \cdot Fo_m\right) \quad - \text{ безразмерный}$$

коэффициент, зависящий от значения массообменного критерия Фурье;

$$Fo_m = \frac{D \cdot \tau_{увл}}{\delta^2} \quad - \text{ массообменный критерий Фурье,}$$

зависящий от постоянных параметров материала D и δ - коэффициента диффузии парообразной влаги и толщины изоляции соответственно, и времени увлажнения $\tau_{увл}$;

С учётом уточнений параметров $u_v(x = \delta)$ и $u_v(\tau = 0)$ выражение примет вид:

$$u_v(\tau, t) = \theta(\tau) \cdot [U(t) - U_{нач}] + U_{нач}; \quad (18)$$

Влияние отказа работы облицовочных панелей на температурный и влажностный режим НФС

Рассмотрим двумерное представление модели, представленной на рис. 1, при котором в момент времени, очень близком к $\tau = 0$, происходит отказ работы одной из облицовочных панелей НФС, состоящей из системы N таких панелей по высоте здания с размерами $b \times h_n$. В этом случае единая система НФС делится на три зоны:

Зона 1 - зона ниже отказа работы высотой:

$$h_1 = N_1 h_n;$$

Зона 2 - Зона выше отказа работы высотой:

$$h_2 = N_2 h_n;$$

Зона 3 - Зона отказа работы высотой:

$$h_3 = h_n;$$

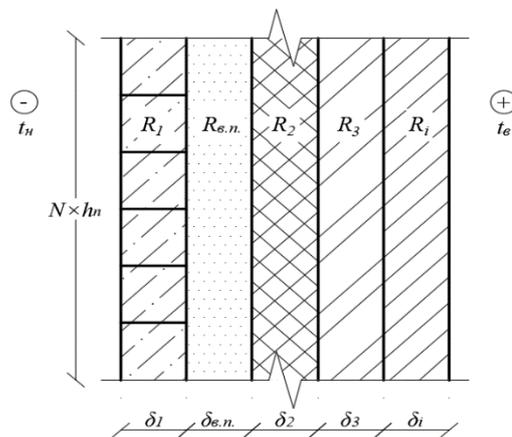


Рис. 3. Схема конструкции
Fig. 3. Design diagram

Значения высот всех трёх зон объединены следующими условиями:

$$N_1 + N_2 + 1 = N; \quad (19)$$

$$h_1 + h_2 + h_3 = h; \quad (20)$$

В зоне 1 и зоне 2 продолжают функционировать воздушные прослойки, но произошло изменение параметра h . На примере зоны 1 (т. к. в сущности обе зоны будут вести себя одинаково) значение высоты изменяется в $\frac{N_1}{N}$ раз. Очевидное воздействие это

оказывает на выражение (8) в части непосредственного изменения высоты h и площади отверстия выхода (или входа для зоны 2) $S_{вых}$. Если начальное значение площади отверстия выхода $S_{вых}^{нач}$ из опыта проектирование имеет размерность квадратных сантиметров (от 50 см² на погонный метр), то после отказа работы фасадной панели, зона 2 становится для зоны 1 отверстием выхода воздуха из прослойки с площадью на погонный метр:

$$S_{вых} = \frac{b \cdot h_n}{L}, \quad \text{где} \quad (21)$$

L – протяженность фасада.

Параметр b из опыта проектирования имеет размерности десятых долей метра, значения высоты панели h_n может достигать (и даже превышать) 1 м. Таким образом, значение площади отверстия выхода изменяется в

$$\frac{S_{вых}}{S_{вых}^{нач}} = \frac{b \cdot h_n}{L \cdot S_{вых}^{нач}};$$

Тогда выражение (8) принимает вид:

$$\sum_j \xi_j = 1,2 \cdot \left(\frac{S_{np}}{S_{ex}} \right)^2 + 0,04 \cdot \frac{N_1 h_n}{2 \delta_{np}} + 1,2 \cdot \left(\frac{S_{np} \cdot S_{вых}^{нач}}{L} \cdot b \cdot h_n \right)^2, \quad \text{где} \quad (22)$$

Из выражения (21) очевидно, что местные потери существенно возрастают по сравнению с начальными и слагаемые $1,2 \cdot \left(\frac{S_{np}}{S_{ex}} \right)^2$ и $0,04 \cdot \frac{h}{2 \delta_{np}}$ становятся на несколько порядков меньше других множителей, потому, пренебрегая ими, оценим отношение начальных местных сопротивлений к конечным:

$$\frac{\sum_j \xi_j}{\sum_j \xi_j^{нач}} \approx \frac{1,2 \cdot \left(\frac{S_{np} \cdot S_{вых}^{нач}}{L} \cdot b \cdot h_n \right)^2}{1,2 \cdot \left(\frac{S_{np}}{S_{вых}^{нач}} \right)^2} = \left(\frac{b \cdot h_n \cdot S_{вых}^{нач}}{L \cdot S_{np}} \right)^2 \quad (23)$$

Тогда согласно (15) можно выразить изменение скорости воздуха в воздушной прослойке:

$$\frac{\tilde{V}_{np}}{\tilde{V}_{np}^{нач}} = \sqrt{\frac{h_1 \times \sum_j \xi_j^{нач}}{h \times \sum_j \xi_j}} = \sqrt{\frac{h_1}{h}} \times \frac{L \cdot S_{np}}{b \cdot h_n \cdot S_{вых}}; \quad (24)$$

По выражениям (12), (14) и (24) получим изменение температуры воздуха в прослойке:

$$\frac{t_{np}}{t_{np}^{нач}} = \left(\frac{x_0}{h_1} \div \frac{x_0^{нач}}{h} \right) \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{h_1}{x_0}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{h}{x_0^{нач}}\right)} = \frac{\tilde{V}_{np}}{\tilde{V}_{np}^{нач}} \cdot \frac{h}{h_1} \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{h_1}{x_0}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{h}{x_0^{нач}}\right)} = \sqrt{\frac{h}{h_1}} \times \frac{L \cdot S_{np}}{b \cdot h_n \cdot S_{вых}} \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{h_1}{x_0}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{h}{x_0^{нач}}\right)}; \quad (25)$$

Выражения (24) и (25) позволяют оценить падение значений температуры и скорости воздуха в воздушной прослойке, что приводит к изменению её теплотехнических свойств и влажностного режима конструкции.

Оценим изменение влажности материала теплоизоляции, основываясь на полученных выражениях.

Влагосодержание материала в начальный момент времени $\tau = 0$:

$$U_{нач} = U(t = 20^\circ C, \varphi) \times [1 - 0,002 \cdot (t_{np}^{нач} - 20) \cdot e^{2,8} \cdot (1 - \varphi)]; \quad (26)$$

Влагосодержание материала на поверхности контакта с воздухом в момент времени $\tau = \tau_{увл}$:

$$U(t) = U(t = 20^\circ C, \varphi) \times [1 - 0,002 \cdot (t_{np} - 20) \cdot e^{2,8} \cdot (1 - \varphi)]; \quad (27)$$

Вычитая (26) из (27), получим:

$$U(t) - U_{нач} = 0,002 \cdot e^{2,8} \cdot (1 - \varphi) \cdot U(t = 20^\circ C; \varphi) \cdot (t_{np}^{нач} - t_{np}); \quad (28)$$

После преобразования разности температур по формуле (25) получим:

$$U(t) - U_{нач} = 0,002 \cdot e^{2,8} \cdot (1 - \varphi) \cdot U(t = 20^\circ C; \varphi) \cdot t_{np}^{нач} \left[1 - \sqrt{\frac{h_1}{h}} \times \frac{b \cdot h_n \cdot S_{вых}^{нач}}{L \cdot S_{np}} \times \frac{1 - \exp\left(-\frac{h}{x_0^{нач}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{h_1}{x_0}\right)} \right]; \quad (29)$$

Применяя (26), (27) и (29) к (18) получим среднее влагосодержание материала в зоне 1 после отказа работы облицовочной панели:

$$u_v(\tau, t) = U(t = 20^\circ C, \varphi) \times \left[0,002 \times e^{2,8} \times (1 - \varphi) \times t_{np}^{нач} \times \left(\theta(\tau) \times \left(1 - \sqrt{\frac{h_1}{h}} \times \frac{b \cdot h_n \cdot S_{вых}^{нач}}{L \cdot S_{np}} \times \frac{1 - \exp\left(-\frac{h}{x_0^{нач}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{h_1}{x_0}\right)} \right) - 1 \right) + 1 \right]; \quad (30)$$

Основываясь на выражении (30), можно оценивать изменение влажности материала теплоизоляции w в любой момент времени после отказа работы облицовочной панели в зоне 1 или зоне 2 (при смене в выражении (30) начальной площади выходного отверстия на площадь входного отверстия).

Рассмотрим теперь влажность материала теплоизоляции непосредственно в зоне отказа работы (зона 2). В зоне 2 происходит понижение температуры воздуха до значения t_n . Тогда, если в начальный момент времени влагосодержание теплоизоляции:

$$U_{нач} = U(t = 20^\circ C, \varphi) \times [1 - 0,002 \cdot (t_{np}^{нач} - 20) \cdot e^{2,8} \cdot (1 - \varphi)]; \quad (31)$$

То после отказа работы облицовочной панели влагосодержание в зоне контакта с воздухом:

$$U(t) = U(t = 20^\circ C, \varphi) \times [1 - 0,002 \cdot (t_n - 20) \cdot e^{2,8} \cdot (1 - \varphi)]; \quad (32)$$

Вычитая (31) из (32):

$$U(t) - U_{нач} = 0,002 \cdot e^{2,8} \cdot (1 - \varphi) \cdot U(t = 20^\circ C; \varphi) \cdot (t_{np}^{нач} - t_n); \quad (33)$$

Применяя (31), (32) и (33) к (18) получим среднее влагосодержание материала в зоне 2 после отказа работы облицовочной панели:

$$u_v(\tau, t) = U(t = 20^\circ\text{C}; \varphi) \cdot \left[\theta(\tau) \cdot \left(0,002 \cdot e^{2,8} \cdot (1 - \varphi) \cdot (t_{np}^{нач} - t_n) \right) + 1 - 0,002 \cdot (t_{np}^{нач} - 20) \cdot e^{2,8} \cdot (1 - \varphi) \right]; \quad (34)$$

Основываясь на формулах (34) и (33), можно проводить проверки и расчеты на превышение предельного приращение влажности теплоизоляции $\Delta w, \%$ в соответствии с требованиями таблицы 10 СП 50.13330.

ВЫВОДЫ

Приведённые в исследовании математические зависимости позволяют оценить изменение влажности материала теплоизоляции после отказа работы облицовочных панелей, изменение скорости воздуха и температуры воздуха в зонах прослойки, которые продолжают функционировать после отказа работы облицовочной панели:

1. Зависимости (30) и (34) показывают изменение влажности после отказа работы облицовочной панели. Отметим, что данные зависимости были получены при сценарии падения только одной облицовочной плиты и, в сущности, являются приближенными зависимостями, т. к. основаны на расчете по приближенной формуле расчета скорости воздуха в воздушной прослойке по СП 345.1325800.2017;

2. Основной задачей будущих исследований авторы видят применение полученных зависимостей на реальных решениях НФС и выявления такого времени τ , при котором теплоизоляция НФС превысит допустимые отклонения по влажности.

3. Перспективным направлением исследования является выявление наихудшего сценария падения облицовочных панелей конструкции для разработки наиболее эффективной и точной методики инженерного расчёта навесных вентилируемых фасадов;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учебник для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1982 – 415 с.
2. Энергосберегающие технологии в современном строительстве: (пер. с англ.) / Подред. В.Б.Козлова. —М.: Стройиздат, 1990. —296 с. (перевод изд.: Energy 85, Energy use in the built environment, Swedish Council for Building Research, Stockholm, 1985).
3. Ржанек Я. Снижение теплопотерь в зданиях: [пер. с чеш.] / Я. Ржанек, А. Яноуш; под ред. Л. М. Махова. —М.: Стройиздат, 1988. —168 с.
4. Радаев А.Е., Гамаюнова О. С., Бардина Г. А. Использование средств оптимизационного моделирования для обоснования характеристик энергоэффективного конструктивного решения//

Строительство и техногенная безопасность №27(79)-2022 С. 5–25.

5. Старков В.Н. Повышение энергоэффективности зданий и сооружений: учеб.пособие/ В. Н. Старков, М. В. Петроченко. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 346с.

6. Данилов Н. И. Энергосбережение в жилищно-коммунальном комплексе / Н. И. Данилов, Я. М. Щелоков, В. Ю. Балдин; под ред. Н. И. Данилова. —Екатеринбург: Издательство ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. — 102 с.

7. Немова Д.В. Навесные вентилируемые фасады: обзор основных проблем// Инженерно-строительный журнал №5(15)- 2010.

8. Ли С.В., Гамаюнова О.С. Фасадные системы в высотном строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 4(4). С. 3-14.

9. Чакин Е.Ю. Энергоэффективные теплоизоляционные материалы для ограждающих стеновых конструкций // Инженерные исследования. 2022. № 1(6). С. 9-18.

10. Цыпленков Д.Е. Выбор теплоизоляционного материала на основе метода многокритериальной оценки альтернатив // Инженерные исследования. 2022. № 5(10). С. 25-30.

11. Тюрин Е.А., Попов М.Ю., Бородин Д.В., Шашков А.И. Пути снижения затрат на эксплуатацию зданий МО РФ за счет увеличения уровня тепловой защиты ограждающих конструкций // Инженерные исследования. 2022. № 5(10). С. 31-36.

12. Шуршилин Е.А., Олехнович Я.А. Энергоэффективные модульные сооружения при разветвлении военных баз // Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения. Материалы всероссийской научно-технической конференции. – СПб. – 2021 г.

13. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»

14. СП 345.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты»;

15. Методика оценки влияния влажности на эффективность теплоизоляции оборудования и трубопроводов. МДС 41-7.2004/ОАО «Теплопроект». — М.: ФГУП Ц П П, 2004. - 16 с.

REFERENCES

1. Bogoslovsky V.N. Stroitel'naya telophysika (thermophysical foundations of heating, ventilation and air conditioning): textbook for universities – 2nd ed., pererab. i dop. – М.: Vyssh. school, 1982 – 415 p., ill.
2. Энергосберегающие технологии в современном строительстве: (пер. с англ.) / Подред. В. Б. Козлова. —М.: Стройиздат, 1990. —296 с.

(перевод изд.: Energy 85, Energy use in the built environment, Swedish Council for Building Research, Stockholm, 1985).

3. Rzhaneck J. Reduction of heat loss in buildings: [per. with Czech.] / J. Rzhaneck, A. Janouš; ed. by L. M. Makhov. — М.: Stroyizdat, 1988. — 168 s.

4. Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A. Use of optimization modeling tools to substantiate the characteristics of an energy-efficient design solution Construction and technogenic safety No. 27(79)-2022 P. 5–25.

5. Starkov V.N. Improving the energy efficiency of buildings and structures: ucheb.posobie / V. N. Starkov, M. V. Petrochenko. — СПб.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2014. — 346 p.;

6. Danilov N. I. Energoresezhenie v residential-kommunal'nogo kommunal'nogo kompleksa / N. I. Danilov, Y. M. Shchelokov, V. Y. Baldin; ed. by N. I. Danilov. — Екатеринбург: Izdatelstvo GOU VPO USTU-UPI, 2006. — 102 p.

7. Nemova D.V. Hinged ventilated facades: an overview of the main problems // Engineering and construction journal No5(15)-2010

8. Li S.V., Gamayunova O.S. Facade systems in high-rise construction // Engineering studies. 2021. № 4(4). S. 3-14. EDN YQXJNV.

9. Chakin E.Y. Energy-efficient thermal insulation materials for enclosing wall structures // Engineering research. 2022. № 1(6). S. 9-18. EDN GYDSPL.

10. Tsyplenkov D.E. Selection of thermal insulation material on the basis of the method of multi-criteria evaluation of alternatives // Engineering studies. 2022. № 5(10). S. 25-30. EDN HPYKLO.

11. Tyurin E.A., Popov M.Yu., Borodin D.V., Shashkov A.I. Ways to reduce the cost of operating buildings of the Ministry of Defense of the Russian Federation by increasing the level of thermal protection of enclosing structures // Engineering studies. 2022. № 5(10). S. 31-36. EDN LOCTZR.

12. Shurshilin E.A., Olekhovich Ya. A. Energy-efficient modular structures in the deployment of military bases // Problems of ensuring the functioning and development of the ground infrastructure of weapons systems. Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference. — СПб. — 2021

13. СП 50.13330.2012 «Thermal protection of buildings»

14. СП 345.1325800.2017 «Residential and public buildings. Rules of thermal protection design»;

15. Methodology for assessing the effect of humidity on the efficiency of thermal insulation of equipment and pipelines. МДС 41-7.2004/ОАО «Теплопроект». — М.: ФГУП Ц П П, 2004. - 16 с.

THE IMPACT OF THE FAILURE OF THE CLADDING PANELS ON THE THERMAL PROPERTIES OF HINGED VENTILATED FACADE STRUCTURES

Shurshilin¹ E. A., Olekhovich² Ya. A.

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Polytechnic Street, 29,

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Polytechnicheskaya Str., 29,

e-mail: ¹shurshilin.ea@edu.spbstu.ru, ²olekhovich_yaa@spbstu.ru

Abstract. One of the most common solutions for external enclosing wall structures are hinged ventilated façade structures, which, thanks to the use of air layers, provide increased energy efficiency. However, such systems have a number of drawbacks, including the formation of cold bridges in the places of attachment of facade panels, which can lead to significant problems in the operation of the system. In addition, it is known that individual facade panels can fall and refuse to work, which leads to a violation of the closure of the air layer and negatively affects the thermal properties of the structure. Therefore, it is necessary to take into account both the shortcomings of the facade structure itself and the problems associated with its operation in order to correctly assess the impact of the failure of the facade panels on the thermal properties of the structure as a whole. This problem is one of the most important for systems of hinged ventilated facades, as it can lead to a complete loss of thermal engineering properties of the structure. This study considers a theoretical solution to the problem of calculating the heat transfer resistance of air layers in hinged ventilated facade structures and organizing this solution into a consistent design methodology for further investigation of the effect of the fall of facing panels on thermal engineering properties of hinged ventilated facades. The main question of the study, consisting in assessing the impact of the failure of the cladding panels on the thermal properties of hinged ventilated facade structures, is considered in accordance with the provisions of the developed methodology and its subsequent mathematical analysis. The need for such a study is justified by the need to determine the most effective ways to eliminate the shortcomings of hinged ventilated facade structures and increase their thermal properties.

Materials and methods: analysis of scientific and technical literature, mathematical analysis of the dependence of the resistance to heat transfer of air layers on the geometric parameters of the structure.

Subject of research: air layers in hinged ventilated façade structures.

Results: mathematical dependences are obtained that allow us to estimate the change in the moisture content of the thermal insulation material of hinged facade systems, the air velocity in the air layer and the air temperature in the air layer because of facing panel's failure.

Conclusions: failure of facing panels of hinged facade systems leads to a change in the humidity of the thermal insulation and the parameters of the air layer, which can lead to exceeding regulatory requirements.

Key words: energy efficiency of buildings and structures, hinged ventilated facades, external enclosing structures of buildings and structures, thermal calculation of buildings and structures, closure of air layers.