

УДК 697.132

Иванцов А.И. – ассистент кафедры проектирования зданий

E-mail: ivantsov@kgasu.ru

Куприянов В.Н. – доктор технических наук, профессор

E-mail: kuprivan@kgasu.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Режим эксплуатации многослойных стеновых ограждающих конструкций, как основа прогнозирования их срока службы

Аннотация

В статье приводятся результаты натурных исследований эксплуатационных воздействий на материалы трех фасадных систем с тонким штукатурным слоем. По результатам исследований уточнены существующие методы расчета тепло-влажностных условий наружных стен, а также разработаны методы расчета эксплуатационных воздействий на материалы наружного утепления и облицовочных слоев, основанные на взаимодействии климатических факторов и свойств ограждающих конструкций.

Ключевые слова: натурные исследования, эксплуатационные воздействия, тепло-влажностное состояние, метод.

Введение

Ограждающие конструкции являются важной частью зданий, которые должны обеспечивать комфортные условия в помещениях весь срок эксплуатации здания. Однако в настоящее время проектный комплекс не располагает информацией о долговечности ограждающих конструкций, которую можно использовать в проектной документации.

Исследованию стойкости материалов в различных температурно-влажностных условиях посвящено большое количество работ, однако во всех исследованиях режим испытаний не моделирует их работу в ограждающих конструкциях, в связи с чем вывод авторов о сроках службы материалов в ограждающих конструкциях является не достоверным. Причиной этого является отсутствие исследований реальных температурно-влажностных режимов эксплуатации различных теплоизоляционных материалов в наружных стенах.

В связи с этим в настоящей работе приведены результаты натурных исследований эксплуатационных воздействий на материалы фасадных систем с тонким штукатурным слоем. Разработаны методы расчета эксплуатационных температур и влажности материалов наружного утепления и облицовочных слоев, которые основаны на взаимодействии климатических факторов и свойств ограждающих конструкций.

1. Существующие методы

Необходимо отметить, что на сегодняшний день не существует комплексной методики прогнозирования сроков службы наружных стен, учитывающей все аспекты проблемы долговечности ограждающих конструкций: механический, физический, экономический, социальный и др. Наиболее полными сегодня являются т.н. феноменологические методы, в основе которых лежит физический аспект проблемы долговечности ограждений. В общем случае данная группа методов основана на оценке долговечности ограждающих конструкций по данным стандартных испытаний их материалов на стойкость к различным воздействиям среды: попеременному замораживанию-оттаиванию, УФ и ИК излучению и пр.

Наиболее точный к настоящему времени метод прогнозирования долговечности наружных ненесущих ограждающих конструкций, разработанный С.В.Александровским, основан на кибернетических подходах к учету данных стандартных испытаний на морозостойкость и результатов проведенных в последнее время экспериментальных исследований поведения строительных материалов при низких отрицательных температурах и криогенных фазовых превращениях поровой влаги [1].

Долговечность ограждения по этому методу определяется по трем показателям, зависящим от попеременного замораживания-оттаивания, т.е. числа переходов через 0 °C:

- по стойкости наружного промерзающего слоя;
- по снижению теплозащитных свойств;
- по снижению прочности утеплителя.

К недостаткам данного метода можно отнести некоторую субъективность в оценке зависимостей изменения основных свойств материалов утеплителей (коэффициента теплопроводности и прочности на сжатие) от климатических воздействий. Данная оценка была проведена на основе экспериментальных исследований одного вида материала – резольнофенолформальдегидного пенопласта – и спроектирована на остальные виды теплоизоляционных материалов. Стоит отметить также не учет влажностного состояния конструкции ограждения в период эксплуатации при определении температурных полей. Автором метода оговорено, что увлажнению утеплителя за счет диффузии теплого влажного воздуха со стороны помещения препятствует применение эффективной пароизоляции, и расчетные массовые отношения влаги в утеплителе могут считаться заданными. Однако применение заданных средних значений влажности материалов утеплителей и их возможное нормируемое приращение не позволяет смоделировать реальные влажностные условия.

Похожий подход к прогнозированию долговечности ограждающих конструкций прослеживается в методе, разработанном Ли А.В. [3]. Срок службы конструкции по данному методу определяется по снижению теплозащитных качеств теплоизоляционного слоя, т.е. увеличения его коэффициента теплопроводности. На основе экспериментальных исследований нескольких видов пенопластов автором определена линейная зависимость увеличения теплопроводности утеплителя от циклического воздействия температуры в виде:

$$\lambda = K_{\lambda} \tau^{\text{цикл}} + \lambda_0.$$

По мнению автора метода, данная зависимость справедлива при любом количестве циклов испытаний или времени эксплуатации. В связи с чем, используя данную зависимость, можно прогнозировать изменение величины коэффициента теплопроводности материала в зависимости от количества расчетных циклов колебания температуры в сечении материала.

Однако, как отмечается самим автором, разработанная методика определения долговечности полимерсодержащих теплоизоляционных материалов имеет некоторые ограничения. Предполагается, что материал полимерсодержащего утеплителя испытывает воздействие постоянных температур и перепадов температуры и влажности. При этом воздействие некоторых внешних факторов, таких как агрессивные химические среды, фотостарение под действием ультрафиолетового излучения, внешние механические нагрузки не учитывается [3].

К существенному недостатку этого метода относится и несколько поверхностный подход к моделированию тепло-влажностных условий эксплуатации ограждения. Автором оставлен без внимания влажностный режим ограждения, а моделирование температурных воздействий ведется по максимальным значениям расчетных амплитуд колебаний температуры наружного воздуха, что при экстраполяции на годовой период даст значительные погрешности.

Сомнительным в этом методе также кажется применение регрессионных коэффициентов увеличения теплопроводности утеплителя, полученного в стандартных условиях (-20 ÷ +20 °C при 98 % влажности), к эксплуатационным условиям, отличающимися как размахом температурных колебаний, так и влажностного состояния конструкции, которое в данном методе остается не учтенным.

Таким образом, исследование реального режима эксплуатации наружных стен на годовом цикле является необходимым условием для разработки адекватного метода прогнозирования срока службы этих конструкций.

2. Методика проведения исследований

С целью определения параметров эксплуатационных воздействий на материальные слои многослойного наружного ограждения на кафедре проектирования зданий

Казанского ГАСУ был разработан и смонтирован испытательный стенд. Натурный испытательный стенд представляет собой кирпичный простенок существующего здания (1), утепленный по системе «мокрый фасад» с использованием трех видов эффективного утеплителя: пенополистирола (2а), минеральной ваты (2б) и газобетона (2в) и штукатурной смеси Ceresit СТ190 ТУ 5745-015-58239148-2010. Характеристики материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

| № слоя | Материал | Толщина слоя, δ, м | Средняя плотность, kg/m^3 | Коэффициент теплопроводности, λ , $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$ | Коэффициент теплоусвоения S_{24} , $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ | Коэффициент паропроницаемости, μ , $\text{мг}/\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$ |
|--------|----------------------|--------------------|---|---|--|--|
| 1 | Кирпичная кладка | 0,64 | 1500 | 0,87 | 10,9 | 0,11 |
| 2а | Пенополистирол | 0,15 | 8,6 | 0,039 | 0,32 | 0,02 |
| 2б | Минеральная вата | 0,15 | 95,8 | 0,035 | 0,74 | 0,32 |
| 2в | Ячеистый бетон | 0,15 | 422 | 0,143 | 2,42 | 0,23 |
| 3 | Штукатурка внешн. | 0,008 | 1350 | 0,26 | 8,48 | 0,098 |
| 4 | Экстр.полистирол | 0,02 | 30 | 0,031 | 0,31 | 0,013 |
| 5 | Штукатурка внутр. | 0,02 | 1350 | 0,87 | 8,95 | 0,098 |

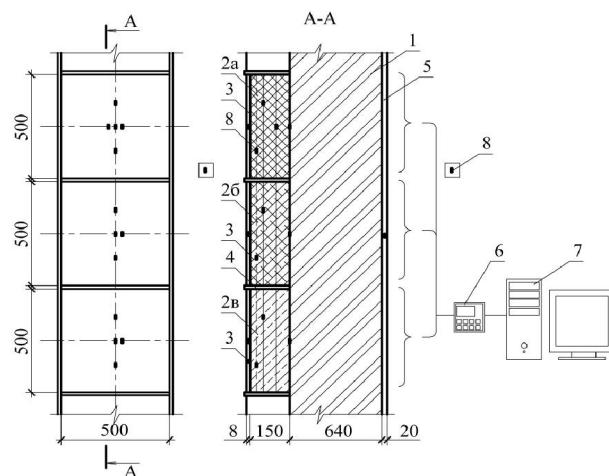


Рис. 1. Схема испытательного натурного стенда
с обозначением расположения датчиков температуры/относительной влажности воздуха:
1 – простенок эксплуатируемого здания; 2а, 2б, 2в – теплоизоляционный материал;
3 – наружный штукатурный слой; 4 – лист экструзионного полистирола;
5 – внутренний штукатурный слой; 6 – адаптер измерительного комплекса Терем 3.2;
7 – персональный компьютер; 8 – датчик температуры/относительной влажности воздуха типа ДТГ-2.0

Теплоизоляционные материалы трех видов толщиной 150 мм каждый закреплены в простенке с помощью пластиковых дюбелей тарельчатого типа. Между собой, существующей стеной здания и оконными откосами установлены листы экструзионного полистирола толщиной 20 мм (4) для устранения дополнительных потоков теплоты и парообразной влаги сквозь испытательный стенд.

В качестве основных показателей эксплуатационного воздействия на материальные слои многослойного ограждения на данном испытательном стенде непрерывно в течение двух лет регистрируются распределения температуры и относительной влажности воздуха в порах материалов по сечению стены, а также внешнее воздействие климата в виде колебаний температуры и относительной влажности наружного воздуха и суммарной солнечной радиации, поступающей на поверхность ограждающей конструкции.

Регистрация показателей эксплуатационных воздействий на испытательном стенде в настоящее время ведется с использованием измерительного комплекса Терем 3.2.

На рис. 1 представлена схема размещения датчиков ДТГ-2.0 комплекса Терем-2.3 по сечению испытательного стенда.

Датчики (8) располагаются таким образом, чтобы по сечению каждого из трех теплоизоляционных материалов было не менее четырех датчиков. В теплоизоляционных слоях из пенополистирола (2а) и минеральной ваты (2б) датчики устанавливались между слоями материала. Для размещения датчиков в газобетоне (2в) вы сверлились специальные каналы, которые после установки датчиков изолировались инертным материалом. Датчики на поверхностях ограждения располагаются непосредственно в толще штукатурных слоев.

Все датчики присоединены к одному адаптеру (6) и имеют одинаковые интервалы регистрации и передачи данных на центральное устройство, равные 15 минутам.

Накопленные в течение суток значения температуры и относительной влажности анализируются и заносятся в таблицу следующего вида:

Таблица 2*

| Размах | Средн. | Мин | Макс | 21.02.14 | | Наружн. | День |
|--------|--------|-------|------|-----------------------|----------------|----------------|------|
| | | | | | | | |
| 19,1 | -7,2 | -16,2 | 2,9 | | | T _н | |
| 56,1 | 75,5 | 38,6 | 94,7 | | | W _н | |
| 79,6 | 4,8 | -12,3 | 67,2 | T ₀ | | | |
| 55,0 | 6,2 | -7,1 | 47,8 | 12, 5 | | | |
| 35,7 | 9,1 | -1,5 | 34,2 | T ₅ | | | |
| 22,8 | 13,3 | 7,8 | 30,6 | T ₁₀ | | | |
| 2,3 | 16,8 | 15,7 | 18,1 | T ₁₅ | | | |
| 75,7 | 37,8 | 5,5 | 81,2 | W ₀ | | | |
| 75,5 | 38,6 | 9,7 | 85,2 | W _{2, 5} | | | |
| 44,8 | 32,3 | 9,4 | 54,2 | W ₅ | | | |
| 22,1 | 22,7 | 13,3 | 35,4 | W _{1 0} | | | |
| 10,1 | 23,9 | 18,4 | 28,5 | W _{1 5} | | | |
| | - | - | - | 24,4 | T _п | | |
| | - | - | - | 55,9 | W _п | | |
| 4,1 | 25,1 | 24,1 | 28,2 | T _в | | | |
| 4,4 | 51,4 | 48,6 | 53,0 | W _в | | | |

* для одного фрагмента стены (с пенополистиролом).

T_н – датчик температуры, W_н – датчик относительной влажности; индексы: н – наружный воздух, в – внутренний воздух, п – внутренняя поверхность, (0, ..., 15) – глубина расположения датчика от наружной поверхности.

3. Анализ результатов исследований

Проводимое исследование позволяет выявить влияние внешних климатических факторов на изменение тепло-влажностного режима ограждающих конструкций. Одним из таких факторов является колебание температуры наружного воздуха, в том числе под действием солнечной радиации, вызывающее изменение температуры поверхности наружной стены.

В классических методах расчета (по Шкловеру А.М.) изменение температуры поверхности ограждения под действием солнечной радиации выражается введением условной эквивалентной добавки $t_{экв} = pq/\alpha_n$ к температуре наружного воздуха:

$$t_{сум} = t_n + \frac{pq_z}{\alpha_n}, \quad (1)$$

где t_n – температура наружного воздуха, °C;

p – коэффициент поглощения солнечной радиации материалом наружной поверхности;

α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности, Вт/ м² °C;

q_z – интенсивность суммарной солнечной радиации в момент времени z на вертикальную поверхность соответствующей ориентации, Вт/м².

Т.е. степень нагрева наружной поверхности ограждения под влиянием солнечной радиации должна зависеть только от интенсивности солнечного излучения и материала наружной поверхности. На рис. 2 представлены графики изменения максимальной температуры поверхности трех участков стенда с различными видами утеплителей в течение февраля 2014 года. Экстремальные значения на графиках соответствуют ясным дням с минимальной облачностью. Как видно из рисунка максимальные значения температуры участка стена с ячеистым бетоном значительно ниже соответствующих значений температур участков с пенополистиролом и минеральной ватой, хотя наружная отделка всех участков одинакова (серая штукатурка, $\rho = 0,7$). Это можно объяснить низкой тепловой инерцией наружной штукатурки и большим влиянием материала последующего слоя. Т.е. чем больше сопротивление теплопередаче слоя следующего за наружным, тем в большей степени может прогреться наружный слой за счет некоторой «оторванности» от тепловой массы стены. Таким образом, классическая формула (1) не отражает реальных физических процессов и применима лишь для однородных (в тепловом плане) конструкций.

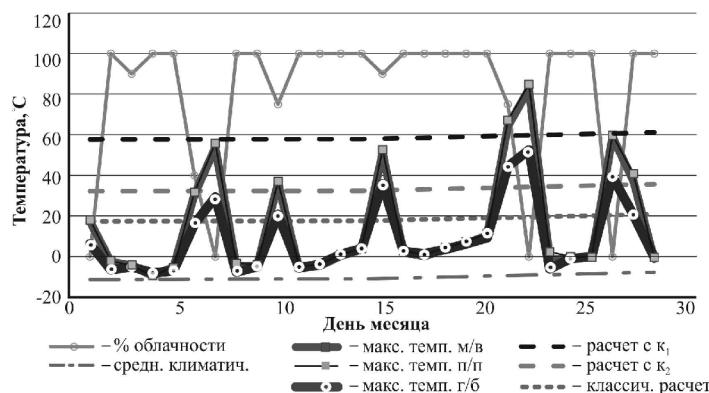


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений максимальных температур наружной поверхности стена

Для моделирования реальных процессов в формулу (1) был введен коэффициент k , определяемый для каждого вида ограждения:

$$t_{\text{сум}} = t_{\text{ср.мес.}} + k \frac{pq_x}{\alpha_n} . \quad (1.1)$$

Расчетные значения максимальных температур от действия солнечной радиации с применением формулы (1.1) представлены на рис. 2.

Изменение температуры наружного воздуха и поверхности ограждения вызывает изменение температуры в толще стены. В произвольном сечении x температура должна описываться уравнением:

$$\tau_x = \tau_{x0} + \frac{A_{\varepsilon_n}}{g_x} \cos \frac{2\pi}{T} (z - \varepsilon_x) + k \frac{pq_x}{g_x \alpha_n}, \quad (2)$$

где τ_{x0} – среднее за период значение температуры в сечении x (определяется по формулам стационарной теплопередачи);

v_x – показатель затухания колебаний в сечении x ;

ε_x – показатель запаздывания сквозного проникания колебаний; приближенно принимается при $T = 24$ ч.

В инженерных расчетах для определения v_x и ε_x используются приближенные формулы, предложенные Богословским В.Н. [2]:

$$v_x = e^{\frac{R_x S_x}{\sqrt{2}}} \frac{S_x + Y_{x+1}}{S_x + Y_x}, \quad (3)$$

где R_x и S_x – сопротивление теплопередачи слоя и коэффициент теплоусвоения материала этого слоя;

Y_x и Y_{x+1} – коэффициенты теплоусвоения поверхностей слоев n и $n+1$ (со стороны движения волны).

$$\varepsilon_x \approx 2,7D_x - 0,4 = 2,7R_xS_x - 0,4. \quad (4)$$

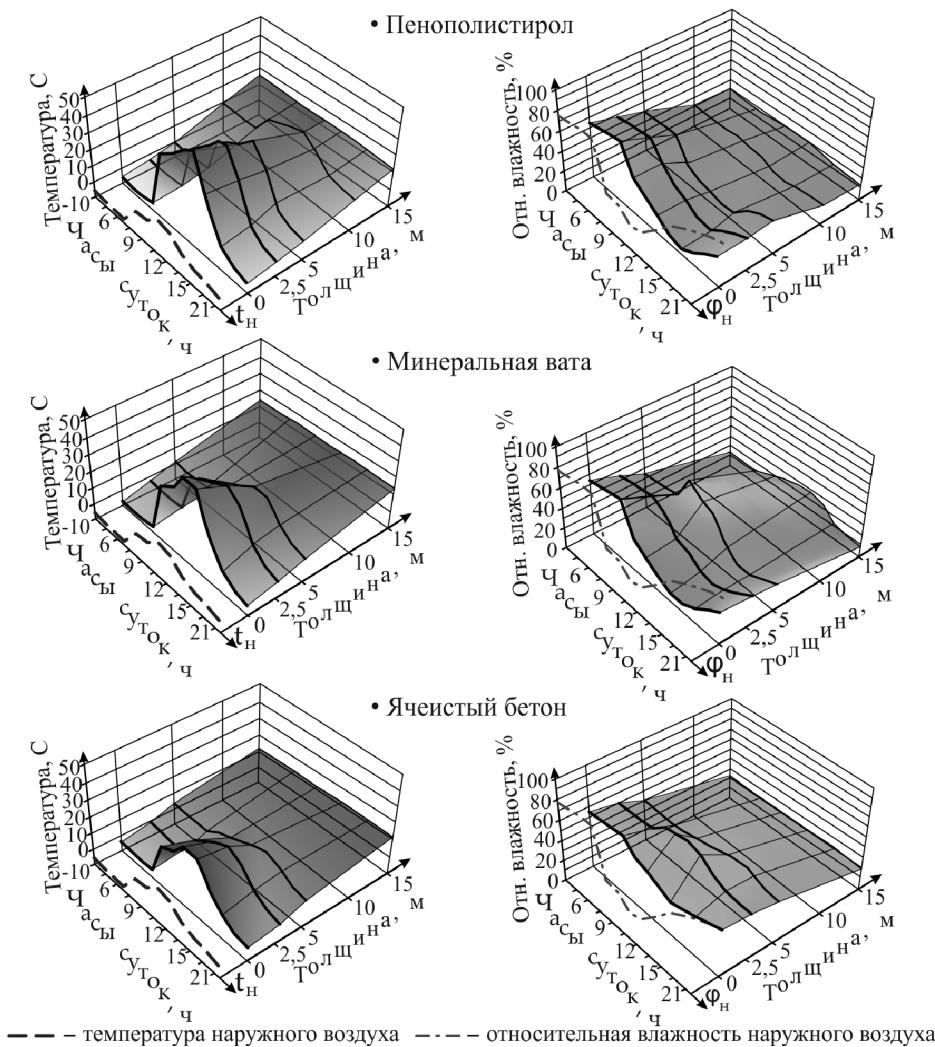


Рис. 3. Распределение температуры и относительной влажности по сечению ограждения в течение суток (4.03.14) (конструкционный слой условно не показан)

На рис. 3 представлены экспериментальные значения изменения температуры и относительной влажности по трем сечениям стендса в течение суток. На графиках изменения температуры четко видно влияние показателей затухания и запаздывания колебаний по сечению стены. Участок стендса с пенополистиролом под действием солнца прогревается практически на всю глубину за короткое время (до 15 см), на участке с минеральной ватой проникновение тепловых колебаний меньше (до 5 см), на участке с ячеистым бетоном это влияние минимальное (менее 5 см).

На рис. 4 представлен график экспериментальных значений распределения показателя запаздывания температурной волны ε_x по толщине трех видов утеплителя (сплошные линии). Здесь же нанесены расчетные величины запаздывания ε_x , вычисленные по формуле (5) (штрих-пунктирные линии). Как можно видеть реальное запаздывание колебаний оказалось значительно меньше расчетного. Экспериментальные данные показывают, что показатель запаздывания сквозного проникания колебаний ε_x в большей степени зависит от коэффициента теплоусвоения материала ограждения и в данном случае приближенно может быть описано следующей предлагаемой зависимостью:

$$\varepsilon_x \approx R_x S_x^2 - 0,4. \quad (4.1)$$

На рис. 4 эти зависимости показаны штриховыми линиями.

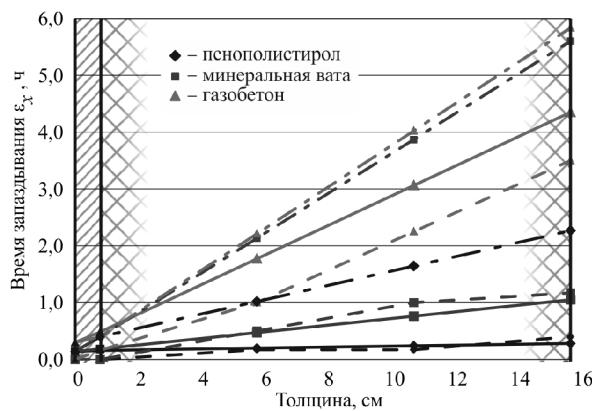


Рис. 4. Показатель запаздывания температурной волны по толщине утеплителя

4. Метод моделирования эксплуатационных воздействий

Результаты экспериментального исследования легли в основу метода моделирования эксплуатационных воздействий на материальные слои наружных стен.

Расчетный год по разработанной методике представляется в виде совокупности воздействий на наружную стену определенной конструкции от «типовых» суток, характеризующих каждый месяц. Для каждого месяца рассчитывается два вида характерных суток для каждого типа наружной стены. Принципиальное различие в расчетных типовых сутках составляет влияние солнечной радиации на фасад здания. Первый тип суток рассчитывается для периода с минимальной облачностью (максимальным воздействием солнечной радиации), второй тип – для периода с максимальной облачностью (этот тип суток будет характеризовать и северную ориентацию фасада).

Так как изменение солнечной радиации носит периодический характер (но не гармонический, так как в ночное время радиация отсутствует) с периодом 24 ч, можно принять, что за одни сутки происходит одно колебание температуры, вызванное этим действием. Однако данные колебания будут происходить лишь в дни с устойчивым солнечным сиянием, т.е. при низком значении общей облачности.

В справочной литературе [6] представлены данные по повторяемости ясного (0-2 балла), полуясного (3-7 баллов) и пасмурного (8-10 баллов) состояния неба по общей и нижней облачности для различных городов и территорий страны.

Допустив, что колебания температуры поверхности ограждения с максимальной амплитудой под действием солнечной радиации происходят в каждый ясный день и 50 % полуясных дней месяца общее количество таких дней определится как:

$$n_1 = (c_{0,2} + 0,5c_{3,7})n/100, \quad (5)$$

где $c_{0,2}$ и $c_{3,7}$ – повторяемость (%) ясного и полуясного состояния неба по общей облачности,

n – количество дней в расчетном месяце.

Максимальная амплитуда температуры для таких дней составит:

$$\Delta t_{pl} = A_{cp, sym.} + k \frac{\rho q_{max}}{\alpha_u}. \quad (6)$$

Количество дней с минимальным воздействием солнечной радиации на фасады зданий составит:

$$n_2 = n - n_1. \quad (7)$$

Амплитуда колебаний определится как:

$$\Delta t_{p2} = A_{cp, sym.}. \quad (8)$$

На рис. 5 представлены распределения температур по сечению стены, характеризующие два вида «типовых суток» для зимнего месяца для города Казани.

Распределение температуры по сечению стены позволяет определить распределение относительной влажности для каждого вида «типовых суток» по методу Фокина. Размах $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$, $\Delta\varphi_3$ в этом случае определяются по расчету.

По рассчитанным «типовым суткам» и их количеству для любого типа ограждения для любого климата можно рассчитать показатели эксплуатационных воздействий:

- максимальный и средний размах температурных колебаний в любом сечении ограждения;
- суммарную энергию, сообщаемую ограждению солнечной радиацией, за расчетный период;
- максимальный и средний размах колебаний относительной влажности в порах материала в любом сечении.

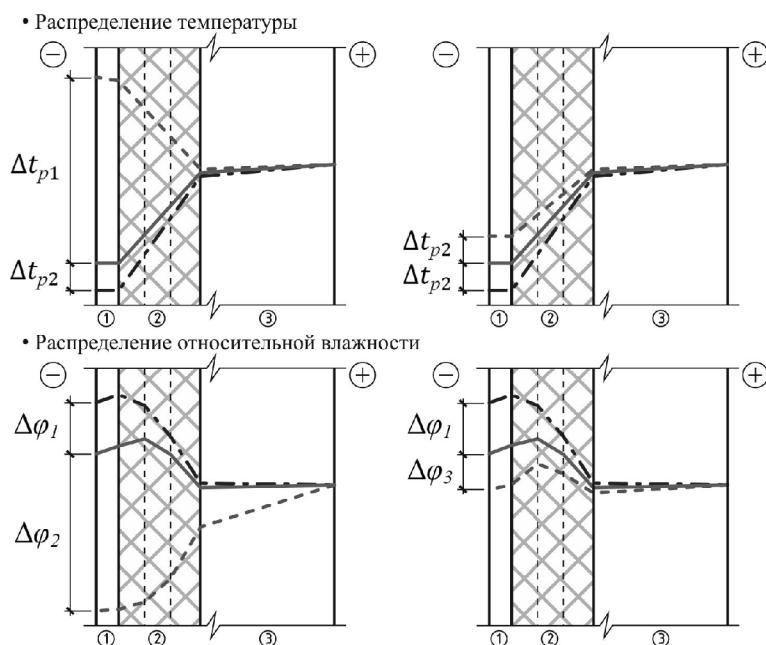


Рис. 5. Расчетные «типовые сутки» для зимнего месяца г. Казани

Список библиографических ссылок

1. Александровский С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций. – М.: НИИСФ РААСН, 2003. – 332 с.
2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). – М.: Высшая школа, 1992. – 415 с.
3. Ли А. В. Долговечность энергоэффективных полимерсодержащих ограждающих конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Хабаровск, 2003. – 143 с.
4. Куприянов В.Н., Иванцов А.И. Конденсация парообразной влаги в наружных стенах при суточных колебаниях температуры наружного воздуха // Приволжский научный журнал, 2013, № 2. – С. 17-22.
5. Иванцов А.И., Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Натурные исследования эксплуатационных воздействий на фасадные системы с различными видами эффективных утеплителей // Жилищное строительство, 2013, № 7. – С. 29-32.
6. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 12. Татарская АССР... – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 326 с.

Ivantsov A.I. – assistant

E-mail: ivantsov@kgasu.ru

Kupriyanov V.N. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: kuprivan@kgasu.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420078, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Operating conditions of multilayer external walls as the basis of their service life prediction

Resume

External walls are an important part of the buildings, which should provide a comfortable environment indoors. Currently, however, a project complex has no information about the durability of building envelope, which can be used in the project documentation.

The article presents the results of field studies of operational impacts on the materials of three facade systems with a thin layer of plaster. The main indicators of operational impact on the material layers of the multilayer wall on this test stand are the distribution of temperature and relative humidity of the air in the pores of materials along the wall recorded continuously for two years, as well as external influences climate in the form of fluctuations in temperature and relative humidity of the outside air and the total solar radiation reaching the surface of the enclosing structure.

Studies have clarified the existing methods for calculating the heat and humidity conditions of exterior walls, as well as to develop methods for calculating the heat and humidity operating condition of the materials of external insulation and cladding layers, based on the interaction of climatic factors and properties of walling.

Keywords: field studies, operational impact, heat and humidity condition, the method.

Reference list

1. Aleksandrovskiy S.V. Longevity of external walls. – M.: NIISF RAASN, 2003. – 332 p.
2. Bogoslovskiy V.N. Building thermal physics (thermophysical fundamentals of heating, ventilation and air conditioning). – M.: Vysshaya shkola, 1992. – 415 p.
3. Li A.V. Durability of energy efficient polymer-walling: dis. ... cand. tehn. sciences: 05.23.01. – Khabarovsk, 2003. – 143 p.
4. Kupriyanov V.N., Ivantsov A.I., The condensation of vaporized moisture in exterior walls in consideration of external temperature's fluctuations // Privolzhskiy nauchnyy zhurnal, 2013, № 2. – P. 17-22.
5. Ivantsov A.I., Kupriyanov V.N., Safin I.Sh. Field investigations of operational impacts on the facade systems with different kinds of effective heaters // Zhilishchnoye stroitelstvo, 2013, № 7. – P. 29-32.
6. Applied research handbook on climate of the USSR. Series 3. Perennial data. Parts 1-6. Issue 12. Tatar ASSR ... L.: Gidrometeoizdat, 1988. – 326 p.