

УДК 699.86

Н.П. УМНЯКОВА, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, Россия, Москва, Локомотивный пр., 21)

Теплопередача через ограждающие конструкции с учетом коэффициентов излучения внутренних поверхностей помещения

В настоящее время при оценке теплозащитных качеств наружных ограждающих конструкций не учитываются отражательные свойства внутренних поверхностей ограждений. Несмотря на то что отечественная промышленность выпускает значительное количество материалов с покрытием алюминиевой фольгой, имеющих низкий коэффициент излучения, при проектировании тепловой защиты этот отражающий эффект не учитывается, что приводит к ограничению применения теплоизоляции такого типа. В работе приведена новая методика, позволяющая провести расчет температуры на внутренней поверхности стены при наличии отражательной теплоизоляции, обращенной блестящей поверхностью внутрь помещения. При расчетах по данной методике учитываются коэффициенты излучения всех поверхностей, обращенных внутрь помещения, – пола, потолка, стен и пр. Значения температуры на внутренней поверхности, полученные в результате расчета по этой методике, сопоставлены с экспериментальными значениями, полученными в ходе натурных обследований конструкции. Сходимость результатов экспериментальных данных и расчетных значений позволяет использовать методику расчета температуры на внутренней поверхности ограждения с учетом коэффициентов излучения поверхностей в практических инженерных расчетах.

Ключевые слова: коэффициент излучения, температура, лучистый тепловой поток, излучение, теплоотдача излучением, теплоотдача конвекцией, теплотехнические исследования.

N.P. UMYAKOVA, Candidate of Sciences (Engineering),

Scientific and Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivny Passage, 127238, Moscow, Russian Federation)

Heat Transfer through Enclosing Structures with Due Regard for Coefficients of Radiation of Inner Surfaces of Premises

At present when assessing heat insulating characteristics of external enclosing structures the reflecting properties of inner surfaces are not taken into account. Despite the fact that the domestic industry produces a significant amount of materials coated with aluminum foil which have a low radiation value this reflecting effect is not taken into account in the course of heat protection designing that leads to limiting the use of such type of heat insulation. The article presents new methods which make it possible to calculate the temperature on the inner surface of the wall if reflective heat insulation the shiny surface of which faces the room is available. Calculations made according to these methods take into account the radiation coefficients of all surfaces facing the room – a floor, a ceiling, walls, and others. Values of temperature on the inner surface obtained as a result of calculations according to these methods are compared with the experimental values obtained in the course of on-site investigations. The convergence of the results of experimental data and calculated values makes it possible to use the methodology of temperature calculation on the inner surface of enclosing structures with due regard for radiation coefficients of surfaces for practical engineering designs.

Keywords: radiation coefficient, temperature, radiant heat flux, radiation, heat release by radiation, heat release by convection, thermal-technical studies.

При расчете теплотехнических свойств наружных ограждающих конструкций в существующей строительной практике в расчетах не учитываются отражательные свойства внутренних поверхностей помещений. Вместе с тем надо отметить, что отечественная промышленность выпускает эффективную отражательную теплоизоляцию из алюминиевой фольги: пенофол, армофол, олефол, литотерм и ряд других разновидностей.

Рассмотрим передачу теплоты излучением и конвекцией и взаимосвязь между помещением и наружными ограждающими конструкциями в объеме помещения. Положим, что абсолютная температура воздуха в помещении $T_{в}$, °К, температура наружного воздуха $T_{н}$, °К, и абсолютная температура внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции $T_{в.п}$, °К.

Примем значение среднего коэффициента излучением всех внутренних поверхностей $C_{ср}$ и найдем его по следующему выражению:

$$C_{ср} = \frac{C_{стен}F_{стен} + C_{покр}F_{покр} + C_{пол}F_{пол} + C_{ост}F_{ост}}{F_{стен} + F_{покр} + F_{пол} + F_{ост}}, \quad (1)$$

где $C_{стен}$, $C_{покр}$, $C_{пол}$, $C_{ост}$ – коэффициенты излучения поверхности стен, покрытия, пола, остекления, Вт/(м²·К⁴); $F_{стен}$, $F_{покр}$, $F_{пол}$, $F_{ост}$ – площади стен, покрытий, пола, остекления, м².

Величина лучистого падающего теплового потока $Q_{пад.л}$, излучаемого объемом воздушной среды с постоянной абсолютной температурой $T_{в}$, и воспринимаемого внутренней поверхностью наружного ограждения площадью 1 м² за 1 ч, имеющей постоянную абсолютную температуру $T_{в.п}$, будет:

$$Q_{пад.л} = \frac{C_{в}C_{ср}}{C_0} \left[\left(\frac{T_{в}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{в.п}}{100} \right)^4 \right], \quad (2)$$

где $C_{ср}$ – средний коэффициент излучения внутренних поверхностей помещения, Вт/(м²·К⁴); $C_{в}$ – коэффициент излучения внутренней поверхности, Вт/(м²·К⁴); C_0 – ко-

коэффициент излучения абсолютно черного тела, равен $5,76 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

В таблице приводятся коэффициенты излучения различных строительных материалов [3].

Уравнение конвективного теплового потока между внутренним воздухом в помещении с абсолютной температурой $T_{в}$ и внутренней поверхностью наружного ограждения 1 м^2 за 1 ч с абсолютной температурой $T_{в.п}$ будет:

$$Q_k = \alpha_{в.к} (T_{в} - T_{в.п}), \quad (3)$$

где $\alpha_{в.к}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией у внутренней поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$.

Количество теплоты, прошедшее за 1 ч через 1 м^2 наружной ограждающей конструкции:

$$Q_{огр} = K (T_{в.п} - T_{н}), \quad (4)$$

где K – коэффициент передачи теплоты от внутренней поверхности ограждающей конструкции к наружному воздуху:

$K = \frac{1}{R_k + R_n}$; R_k – термическое сопротивление ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$; R_n – сопротивление теплоотдаче у наружной поверхности, $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$.

При расчете лучисто-конвективного теплообмена в помещении пренебрежение многократным отражением излучения не вызывает ошибок, выходящих за пределы точности инженерных расчетов (В.Н. Богословский, Е.О. Шилькрот. Расчет лучисто-конвективного теплообмена в помещении с учетом многократного отражения. Вопросы теплового и воздушного режимов кондиционирования микроклимата. МИСИ. 1970. Сб. трудов № 68). Объясняется это тем, что при учете коэффициента излучения внутренней поверхности в объеме помещения многократное отражение становится несущественным. В исследованиях автора [1, 2] при определении теплозащитных качеств воздушных прослоек с отражательной теплоизоляцией установлено, что многократное отражение и поглощение лучистого потока незначительно влияет на их термическое сопротивление. Поэтому в инженерной практике при решении большинства задач лучистого и конвективного теплообмена в объеме помещений можно принять упрощенные схемы расчета и не учитывать многократное отражение.

С учетом вышесказанного на основе уравнений (2), (3) и (4) для стационарных условий после соответствующих преобразований получим формулу для определения температуры на внутренней поверхности ограждения $t_{в.п}$ с учетом коэффициентов излучения в следующем виде:

$$t_{в.п} = \frac{t_{в} \left(\alpha_{в.л} \frac{C_{в} C_{ср}}{C_{пр} C_0} + \alpha_{в.к} \right) + \kappa t_{н}}{\alpha_{в.п} \frac{C_{в} C_{ср}}{C_{пр} C_0} + \alpha_{в.к} + \kappa}, \quad (5)$$

где $\alpha_{в.к}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$; $\alpha_{в.л}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$; $C_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $t_{в}$ и $t_{н}$ – температура внутреннего и наружного воздуха, °С .

Методика последовательного определения температуры на внутренней поверхности ограждающей конструкции $t_{в.п}$ по уравнению (5) будет состоять в следующем.

По таблице принимаются коэффициенты излучения всех внутренних поверхностей помещения и по выражению (1) находится средняя величина коэффициента излучения $C_{ср}$, задается нормируемая величина температурно-

Материал	Коэффициент излучения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Алюминий полированный	0,23–0,34
Алюминий с шероховатой поверхностью	0,34–0,4
Алюминиевая фольга	0,5
Алюминиевая окраска	2,88
Алюминиевый лак на шершавой пластине	2,25
Сталь нержавеющая полированная	0,43
Сталь тонколистовая гладкая	0,57–1,15
Сталь тонколистовая	2,3–3,45
Железо полированное	0,8–2,18
Железо с темно-серой поверхностью	1,78
Железо слегка поржавевшее	3,51
Железо сильно поржавевшее	4,9
Лак черный блестящий, распыленный на пластине	4,95
Лак белый	4,6
Лак черный матовый	5,52
Эмалевая краска	5,18
Асфальт	5,35
Асбестоцемент шероховатый	5,52
Кирпич глиняный обыкновенный шероховатый	5,1–5,3
Стекло оконное гладкое	5,41
Толь кровельная	5,86
Штукатурка известковая шероховатая	5,23
Бетон	5,23
Цементный раствор	3,9
Плитка метлахская гладкая	4,69
Плитка	5,35
Вода (слой толщиной 0,1 мм)	5,32
Снег	5,18
Лед	5,25
Песок	4,37

го перепада между температурой воздуха в помещении и температурой на поверхности ограждающей конструкции согласно СП 50.13330.2012 Актуализированная редакция СНиП 23-02–2003 «Тепловая защита зданий» и определяются коэффициенты теплоотдачи конвекцией $\alpha_{в.к}$, излучением $\alpha_{в.л}$. По этим параметрам вычисляют температуру на внутренней поверхности ограждающей конструкции $t_{в.п}$.

Для проверки разработанной методики определим температуру на внутренней поверхности наружной стены с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги в производственном помещении завода ЛИТ в г. Переславль-Залесском (Ярославская обл.). Ограждающие конструкции цеха – стены и покрытие были обшиты с наружной стороны по каркасу стеновым профнастилом ВС-18 (рис. 1, 2). Общий вид промышленного здания приведен на рис. 3.

В конструкции наружной стены использовался стеновой профилированный металлический настил ВС-18, изготовленный из оцинкованной стали с полимерным покрытием бежевого цвета RAL 1014 с двух сторон. По нему с внутренней стороны помещения был установлен утеплитель Пенофол Супер NET типа С толщиной 15 мм с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги. Эффективная отражательная теплоизоляция ($C=0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$) была обращена внутрь производственного цеха (рис. 4).

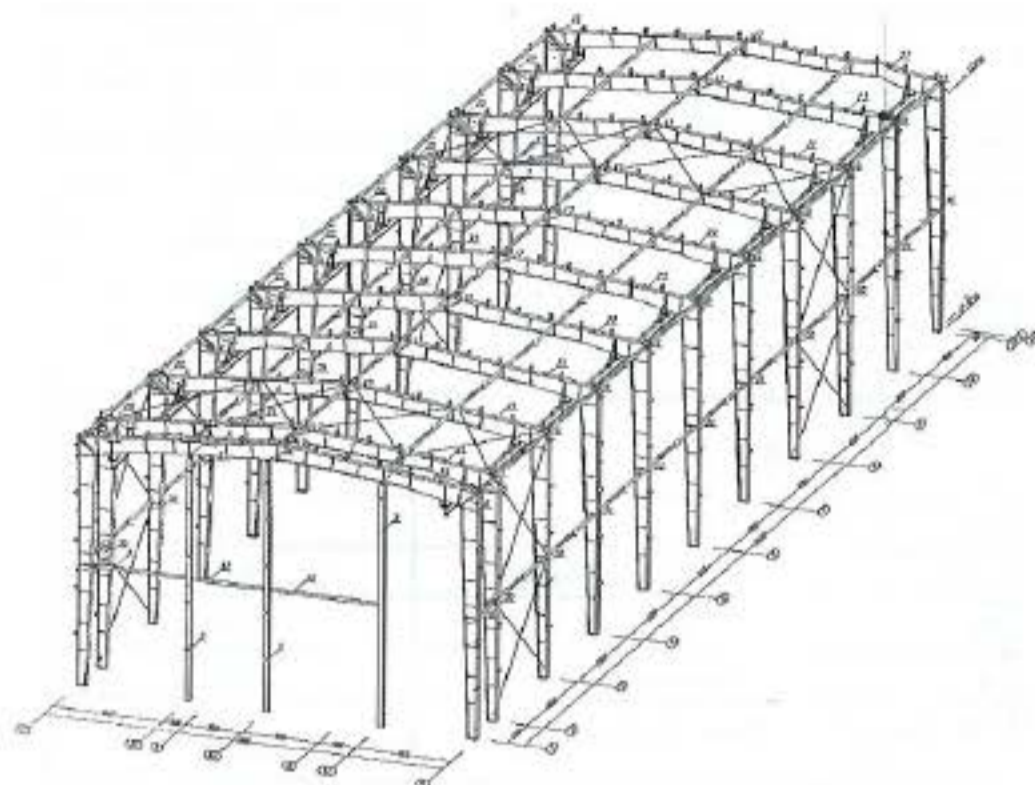


Рис. 1. Каркас производственно-складского здания завода ЛИТ

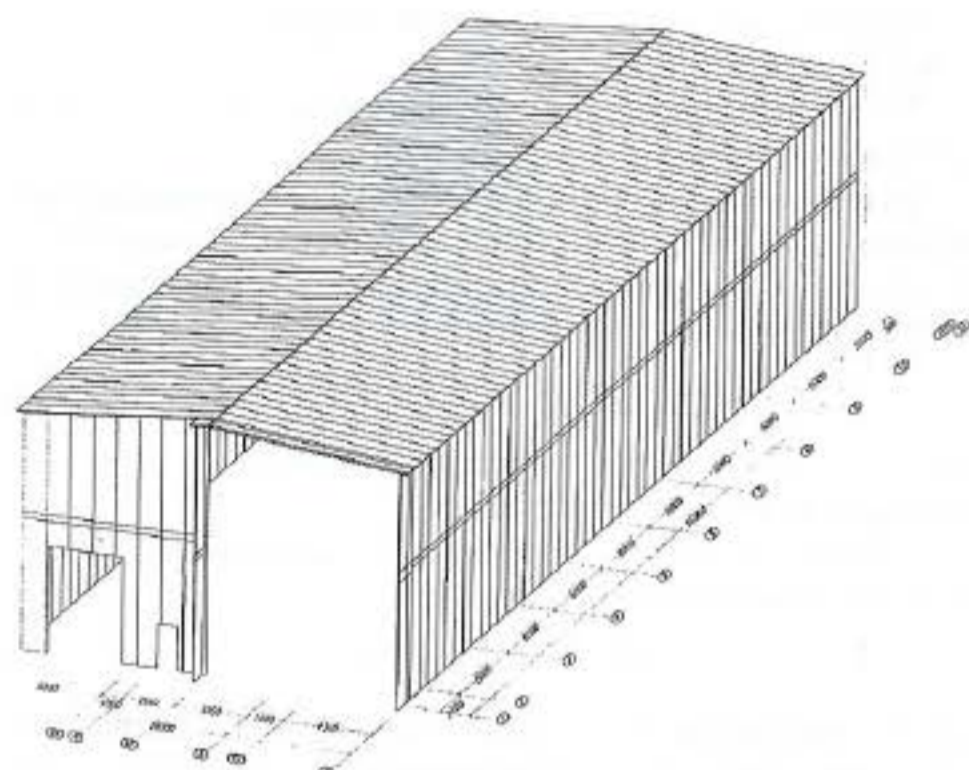


Рис. 3. Общий вид производственно-складского здания завода ЛИТ

Для определения теплоизоляционных свойств ограждающей конструкции, состоящей из стенового профнастила ВС-18 толщиной 3 мм и прилегающего к нему пенофола толщиной 15 мм с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги, были проведены натурные теплотехнические исследования. Замеры температуры на поверхности и относительной влажности воздуха проводились датчиками температуры, термохронами и гигрохронами; замеры тепловых потоков – тепломерами.

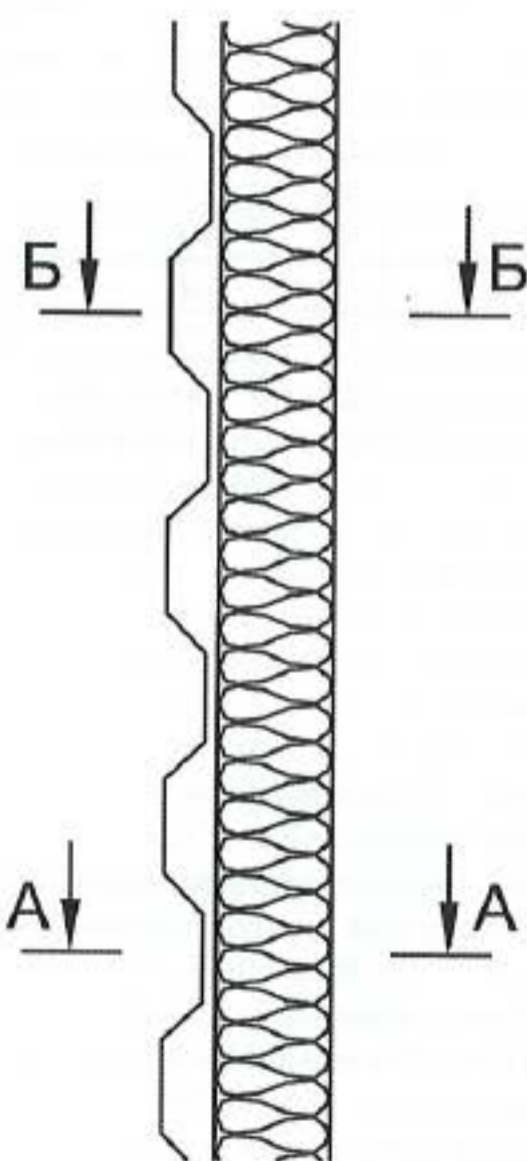


Рис. 2. Конструкция наружной стены производственно-складского здания завода ЛИТ, выполненная из профилированного металлического настила с офольгированным утеплителем Пенофол Супер NET толщиной 15 мм

Натурные теплотехнические исследования проводили в помещении цеха с 15 по 25 января 2013 г. Распределения температуры в сечении А-А ограждающей конструкции, состоящей из профилированного металлического настила и пенофола толщиной 15 мм, на котором отражательная теплоизоляция из алюминиевой фольги обращена внутрь помещения, приведены на рис. 5. Также было получено распределение температур в сечении Б-Б ограждающей конструкции с образованной гофром воздушной прослойкой толщиной 16,5 мм и пенофолом толщиной 15 мм с отражательной изоляцией из алюминиевой фольги, обращенной внутрь помещения.

Величины температурных перепадов при средней за период замеров температуре вну-

треннего воздуха $t_{вн} = 16,9^{\circ}\text{C}$ и наружного воздуха $t_{нв} = -13,9^{\circ}\text{C}$ составили для сечения А-А $\Delta t' = t'_{вн} - t'_{нв} = 6,9 + 8,84 = 15,74^{\circ}\text{C}$ и для сечения Б-Б $\Delta t'' = t''_{вн} - t''_{нв} = 7,18 + 10,18 = 17,36^{\circ}\text{C}$.

Термическое сопротивление в сечении А-А по пенофолу толщиной 15 мм составило $0,3 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. При этом термическое сопротивление профнастила толщиной 3 мм и коэффициентом теплопроводности $58 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ не учитывалось, поскольку эта величина равна $5,17 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Коэффициент теплопроводности по результатам натурных испытаний пенофола колебался в диапазоне $\lambda = 0,047 - 0,049 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Термическое сопротивление в сечении Б-Б по пенофолу толщиной 15 мм и воздушной прослойкой толщиной 16,5 мм, образованной гофром в стеновом профнастиле, составило $0,54 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Следует отметить, что воздушная прослойка толщиной 16,5 мм и шириной 90 мм имеет термическое сопротивление $0,24 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Объяснить это можно низким коэффициентом излучения оцинкованной поверхности стенового профнастила и замкнутостью воздушной прослойки.

В связи с тем, что рассматриваемая конструкция неоднородна, определение теплозащитных свойств проведено с учетом термических сопротивлений, полученных при ее разделении плоскостями, параллельными и перпендикулярными тепловому потоку. В результате получена величина термического сопротивления конструкции наружной стены $0,36 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Известно, что передача теплоты к поверхности и ее отдача происходят за счет конвективного и лучистого теплообмена. Для наружной поверхности коэффициент конвективного теплообмена составил $\alpha_{н,к} = 20,81 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. При определении коэффициента лучистого теплообмена для металлического профнастила коэффициент излучения $1,31 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, для снега – $5,18 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Такой высокий коэффициент излучения белой поверхности снега объясняется следующим. Множественные исследования в лабораторных и природных условиях показали, что только выпавший снег имеет коэффициент излучения $5,67 - 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$, а старый, слежавшийся – $5,58 - 5,64 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$. Еще в 1950-е гг. П.П. Кузьмин (П.П. Кузьмин. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 178 с.) объяснил это свой-



Рис. 4. Вид производственного здания завода ЛИТ с наружными стенами, утепленными материалом Пенофол Супер NEI с отражательной изоляцией из алюминиевой фольги, обращенной внутрь помещения

ство тем, что поверхность снежного покрова имеет огромное количество пор сложной формы с очень маленькими «выходами» на поверхность. Аналогичную структуру имеет искусственно созданная модель абсолютно черного тела (так называемый «черный поглотитель») в виде сосуда с небольшим входным отверстием. Через него лучи проникают и выходят, претерпевая множество отражений внутри, намного ослабляющих их энергию. Кузьмин считает, что поры снежного покрова играют роль таких снежных поглотителей. Излучательная способность слежавшегося снежного покрова понижается из-за уменьшения количества поровых отверстий, выходящих на поверхность. При этом сами отверстия становятся крупнее за счет укрупнения зерен снега. Коэффициент излучения снега можно принять $5,18 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

После соответствующих вычислений получаем коэффициент излучения $\alpha_{\text{и.л.}}=0,89 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$. Сопротивление теплообмена у наружной поверхности $R_{\text{н}}=1/(20,81+0,89)=1/21,7=0,046 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$.

При определении суммы двух коэффициентов конвективного и лучистого теплообмена у внутренней поверхности из алюминиевой фольги коэффициент конвективного теплообмена составил $\alpha_{\text{в.к.}}=3,55 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$, коэффициент лучистого теплообмена $\alpha_{\text{в.л.}}=0,35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$, сопротивление теплообмену у внутренней поверхности $R_{\text{в}}=1/(3,55+0,35)=0,256 \text{ м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$.

Общее сопротивление теплопередаче стены с учетом отражающих свойств покрытия из алюминиевой фольги составило $R_0=0,256+0,36+0,046=0,66 \text{ м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$.

Температура на внутренней поверхности стены с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги определялась по формуле (5). При этом по формуле (1) находился средний коэффициент излучения помещения при коэффициенте излучения поверхности стены $C=0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, покрытия $C=0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ и бетонного пола $C=5,23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, который равнялся $C_{\text{ср}}=0,407 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

После подстановки полученных теплофизических величин в формулу (5) с учетом $t_{\text{в}}=16,9\text{°С}$ и $t_{\text{н}}=-13,9\text{°С}$ температура на внутренней поверхности составила $t_{\text{в}}=6,74\text{°С}$.

Таким образом, сопоставляя полученную расчетом температуру $t_{\text{в}}=6,74\text{°С}$ с экспериментальной температурой $t_{\text{в}}=(7,2+6,9):2=7,05\text{°С}$, установлено, что расхождения со-

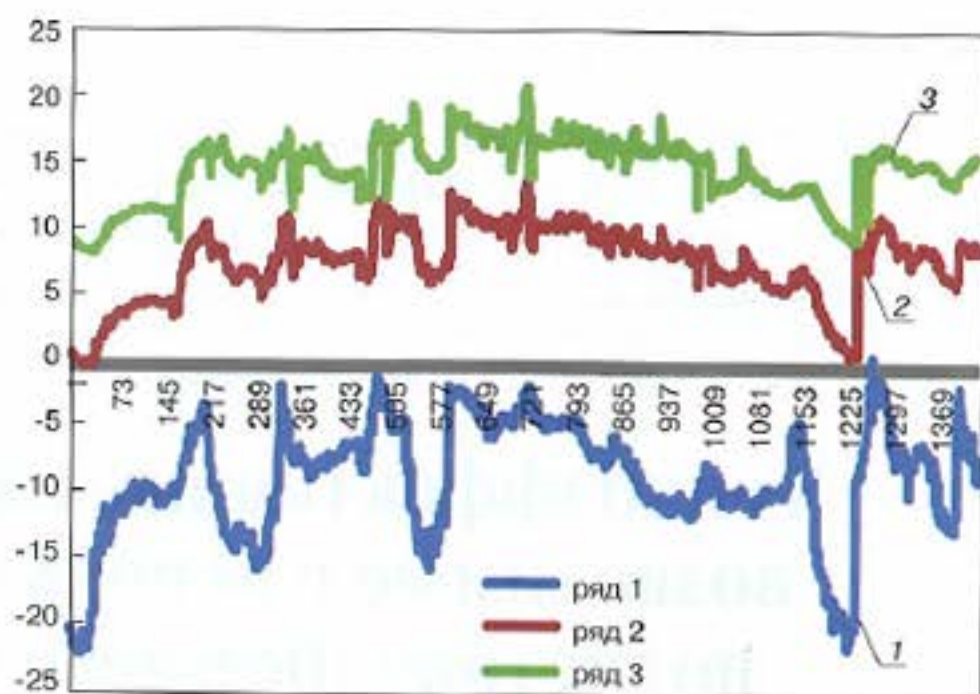


Рис. 5. Распределение температур в сечении А–А северной стены цеха: ряд 1 – температура на наружной поверхности стены; ряд 2 – температура на внутренней поверхности стены; ряд 3 – температура воздуха на расстоянии 160 мм от внутренней поверхности стены

ставляют $0,31\text{°С}$, или $4,3\%$, что позволяет рекомендовать предложенную методику для инженерно-практических расчетов.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований новые значения сопротивления теплоотдаче у внутренней ограждающей конструкции с отражательной теплоизоляцией из алюминиевой фольги в помещении создают «тепловой эффект термоса», приводящий к повышению теплозащиты и снижению теплопотерь.

Предложенная новая методика расчета определения температуры на внутренней поверхности ограждающей конструкции в отличие от традиционного теплотехнического расчета позволяет учитывать на внутренней поверхности помещения изменение коэффициентов излучения в широком диапазоне от $0,5$ до $5,76 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Список литературы

1. Умнякова Н.П. Теплозащита замкнутых воздушных прослоек с отражательной теплоизоляцией // *Жилищное строительство*. 2014. № 1–2. С. 16–20.
2. Умнякова Н.П. Энергоресурсосбережение в строительстве – элемент концепции биосферной совместимости человека с окружающей средой // *Биосферно-совместимые города и поселения: Материалы международной конференции*. Брянск 11–13 декабря 2012 г. С. 56–64.
3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 230 с.

References

1. Umnyakova N.P. Heat protection of closed air spaces with reflective insulation. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014. No. 1–2, pp. 16–20. (In Russian).
2. Umnyakova N.P. Energy and resources saving in buildings – element of the concept of biosphere compatibility with the environment. *Biosferosovmestimye goroda i poseleniya. Materialy mezhdunarodnoi konferentsii*. Bryansk 11–13 dekabrnya 2012, pp. 56–64. (In Russian).
3. Fokin K.F. Building thermotechnics of enclosing parts of buildings [Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastei zdaniy]. M.: AVOK-PRESS, 2006. 230 p. (In Russian).