

Министерство образования и науки Российской Федерации
Institute of Hydrodynamics Academy of Sciences of the Czech Republic
Ангарская государственная техническая академия
Астраханский государственный технический университет
Белгородский государственный технологический университет
Белорусский государственный аграрный технический университет
Белорусский государственный университет
Белорусский государственный технологический университет
Белорусский национальный технический университет
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Донской государственный технический университет
Ивановский государственный химико-технологический университет
Институт вычислительной математики РАН
Институт проблем управления РАН
Казанский национальный исследовательский технологический университет
Московский политехнический университет
Пензенская государственная технологическая академия
Российский химико-технологический университет
Рязанский государственный радиотехнический университет
Самарский государственный технический университет
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Тамбовский государственный технический университет
Тверской государственный технический университет
Ярославский государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

СБОРНИК ТРУДОВ
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 8

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2018

УДК 004+51.7+519.6

ББК 22.1:32.81

М34

Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 8 / под общ. ред. А. А. Большакова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. - 100 с.

В сборнике публикуются труды участников XXXI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях», которая состоится в Санкт-Петербургском государственном технологическом институте (техническом университете), Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН (г. Санкт-Петербург, 10–14 сентября 2018 г., посвящена 190-летию СПбГТИ(ТУ)); в СГТУ имени Гагарина Ю.А. (г. Саратов, 20-21.09.2018г.); в БГАТУ, БГТУ, БНТУ, БГУ, БГУИР (г. Минск, Беларусь, 8-12 октября 2018г.). Представленные материалы отражают современные направления математического и компьютерного обеспечения для решения фундаментальных проблем, связанных с синтезом и применением математических моделей технологических, технических и организационно-технических систем.

Сборник предназначен для специалистов, занимающихся использованием математических методов в технике и технологиях.

Доклады рецензированы и отрецензированы редакционной коллегией конференции ММТТ-31.

Редакционная коллегия:

Главный редактор: д-р техн. наук, проф. *А. А. Большаков*

Заместители главного редактора: д-р техн. наук, проф., проф. *В. С. Балакирев*; д-р техн. наук, проф., проф. ТГТУ *С. И. Дворецкий*; д-р техн. наук, проф., зав. каф. КНИТУ *Н. Н. Зиятдинов*; д-р техн. наук, проф., зав. каф. СПбГТУ (ТИ) *Т. Б. Чистякова*.

Члены редакционной коллегии: д-р техн. наук, проф., ВГУ *Г. В. Абрамов*; д-р техн. наук, проф. зав. кафедрой КГАСУ *Ф. Г. Ахмадиев*; д-р техн. наук, вед. науч. сотр. Института проблем химической физики РАН *В. Н. Бабак*; д-р техн. наук, проф., МГТУ имени Н.Э. Баумана *Т. И. Булдакова*; д-р наук, проф., вед. научн. сотр., председатель Совета Института гидродинамики Чешской Академии наук *П. Власак*; д-р техн. наук, проф. ЮФУ *А. Р. Гайдук*; д-р техн. наук, проф., зам. директора филиала НИУ «МЭИ» в г. Смоленске *М. И. Дли*; д.ф.-м.н., проф. ТвергТУ *А. Л. Калабин*; д-р техн. наук, проф., директор института АстрГТУ *И. Ю. Квятковская*; д-р техн. наук, проф. СГТУ имени Гагарина Ю.А. *В. А. Коломейцев*; д-р техн. наук, проф. ВолгТУ *А. Г. Кравец*; д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ИГХТУ *А. Н. Лабутин*; д-р техн. наук, проф., зав. каф. СамГТУ *М. Ю. Лившиц*; академик РАН, д-р техн. наук, проф., директор института РХТУ имени Д. И. Менделеева *В. П. Мешалкин*; д-р техн. наук, проф. ДГТУ *Р. А. Нейдорф*; д-р техн. наук, проф. НИУ «МЭИ» *О. М. Проталинский*; чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., зав. лаб. Института проблем точной механики и управления РАН *А. Ф. Резчиков*; д-р техн. наук, проф. СГТУ имени Гагарина Ю.А. *М. Ф. Степанов*; д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВолгГТУ *И. В. Степанченко*; академик РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института вычислительной математики РАН *Е. Е. Тыртышников*; д-р техн. наук, проф. АГТУ *А. А. Ханова*; д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВолгГТУ *М. В. Щербаков*.

Ответственный редактор: канд. техн. наук, доц., доцент Московского Политеха *Д. В. Зубов*.

Технический редактор: *С. А. Большакова*

Сборник издан при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-20081 Г).

© Большаков А. А., научное редактирование, 2018
© Издатель. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018
© Издатель. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., 2018

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ОТРАЖАТЕЛЬНУЮ ИЗОЛЯЦИЮ

В.А. Кузьмин^{1,2}

¹ИЦСА ИПС им. А.К. Айламазяна РАН,

Россия, Ярославская область, г. Переславль-Залесский, kuba@kuba.pereslav.ru

²АО «Завод ЛИТ», Россия, Ярославская область, г. Переславль-Залесский, lte@zavodlit.ru

Аннотация. Изложены модели, алгоритмы и структура комплекса программ, который позволяет проводить расчет многослойных ограждающих конструкций, содержащих отражательную изоляцию и воздушные прослойки.

Ключевые слова: отражательная теплоизоляция, проектирование ограждающих конструкций, теплотехнический расчет, программа для расчета теплотехники ограждающих конструкций, утепление.

ALGORITHMS AND SOFTWARE ANALYSIS OF BUILDING ENCLOSURES CONTAINING REFLECTIVE INSULATION

Kuzmin Vasilij Alexandrovich^{1,2}

¹PSI RAS, Program Systems Institute, Russia, Pereslavl-Zalessky, kuba@kuba.pereslav.ru

²AO «Zavod LIT», Russia, Pereslavl-Zalessky, lte@zavodlit.ru

Abstract. The models, algorithms and structure of the program complex, which allows to calculate multilayer enclosing structures containing reflective radiation and air layers, are presented.

Keywords: reflective thermal insulation, design of enclosing structures, thermal calculation, program for the calculation of thermal engineering of enclosing structures, insulation.

Введение. Широкое распространение архитектурных проектов, использующих авторские решения, сжатые требования к выполнению проектных работ, необходимость контроля соблюдения действующих строительных норм и правил диктует необходимость использования набора автоматизированных приложений, помогающих выполнять технические расчеты согласно нормативно-технической документации, избежать ошибок и значительно сократить время создания проекта. В связи тенденцией к применению новых материалов, повышением стоимости энергоресурсов и пристального внимания к проблеме теплового загрязнения является актуальной задача расчёта тепловой защиты зданий и сооружений. Перспективным методом повышения энергоэффективности является использования отражательной изоляции, которая позволяет при малой стоимости, ничтожном собственном объёме достичь в ряде случаев существенной экономии тепловой энергии.

Цель работы. В настоящее время в Российской Федерации действуют следующие нормативные документы в рассматриваемой нами области: СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» и, вступивший в действие в июне 2016 года, ГОСТ Р 56734-2015 «Здания и сооружения. Расчет показателя теплозащиты ограждающих конструкций с отражательной теплоизоляцией». Основные физические закономерности, изложенные в упомянутых методиках, описаны в работах В.Н. Богословского [2, 3, 4]. Нами поставлена и успешно достигнута цель создания комплекса прикладных программ для проектирования энергоэффективных ограждающих конструкций. Комплекс пакетов прикладных программ LIT THERMO ENGINEER получил свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2014617857 и успешно применяется на практике (см. рис. 1).

Для достижения поставленной цели поставлены задачи

– разработка на основе экспериментальных данных модели процесса теплопередачи через воздушную прослойку, содержащую отражательную изоляцию;

– разработка алгоритмов расчёта термических сопротивлений типовых слоёв строительных материалов и реализация интерфейса для их использования.

Основная часть. Рассмотрим основные уравнения модели передачи тепла через теплоизоляцию.

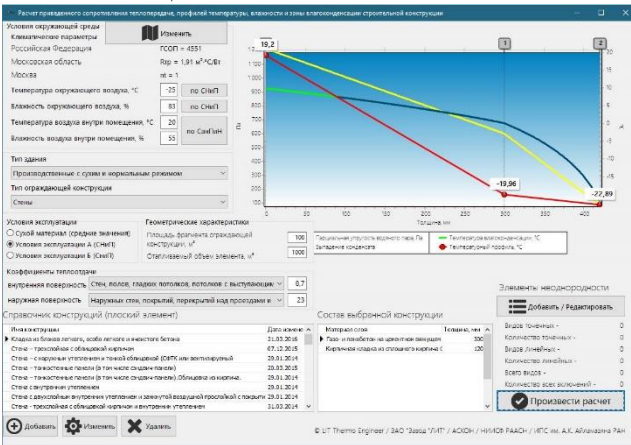


Рис. 1. Интерфейс пользователя. Расчет сопротивления теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции

Сопротивление теплопередаче вертикального наружного ограждения (наружной стены) R_0 , $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, определяется [2]:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_g} + R_k + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (1)$$

где α_g – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°C}$; R_k – термическое сопротивление ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$; α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°C}$.

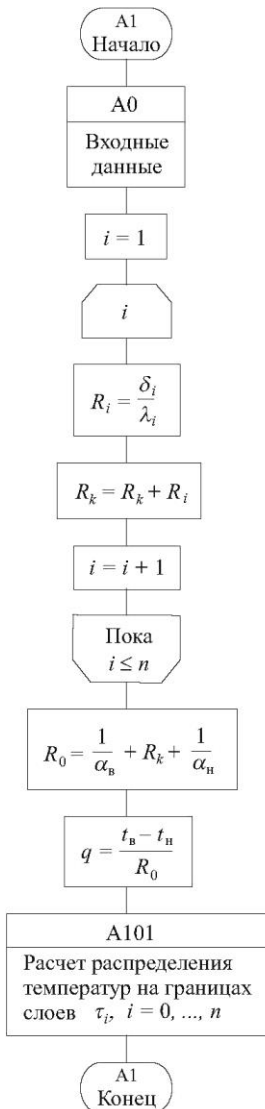


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции

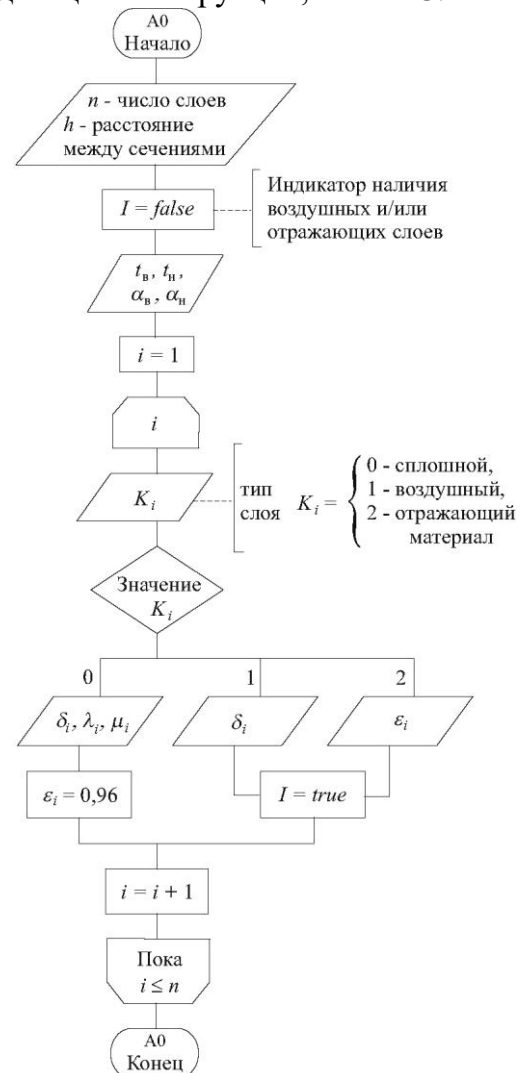
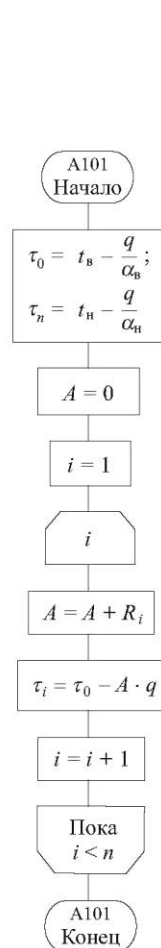


Рис. 3. Блок-схема определения наличия в ограждающей конструкции воздушных прослоек и отражательной изоляции

Термическое сопротивление многослойной ограждающей конструкции R_k , включающей последовательно расположенные конструкционные, теплоизоляционные, облицовочные слои и воздушные прослойки, равно:

$$R_k = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{в.п.}, \quad (2)$$

где δ_i – толщина i -го слоя конструкции, м; λ_i – расчетный коэффициент теплопроводности материала i -го слоя конструкции, Вт/м·°С; $R_{в.п.}$ – термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки, расположенной параллельно слоям многослойной конструкции, м²·°С/Вт.

Термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки $R_{в.п.}$ в ограждающей конструкции рассчитывается по формуле [2]:

$$R_{в.п.} = \frac{\tau_{1в.п.} - \tau_{2в.п.}}{q}, \quad (3)$$

где $\tau_{1в.п.}$ – температура на поверхности воздушной прослойки, расположенной ближе к внутренней поверхности ограждающей конструкции, °С; $\tau_{2в.п.}$ – температура на поверхности воздушной прослойки, расположенной ближе к наружной поверхности ограждающей конструкции, °С; q – поток теплоты, проходящий через 1 м² наружного ограждения с воздушной прослойкой, Вт/м².

Поток теплоты q , проходящий через воздушную прослойку состоит из трех составляющих:

$$q = q_{изл.} + q_{мен.} + q_{кон.}, \quad (4)$$

где $q_{изл.}$ – поток теплоты, передаваемый излучением, Вт/м²; $q_{мен.}$ – поток теплоты, передаваемый теплопроводностью, Вт/м²; $q_{кон.}$ – поток теплоты, передаваемый конвекцией, Вт/м².

Температуры по слоям многослойного ограждения и на поверхности воздушной прослойки $\tau_{1в.п.}$ и $\tau_{2в.п.}$ вычисляют по формуле:

$$\tau_n = t_g - \frac{t_g - t_n}{R_0} (R_{в.п.} + \sum_{n-1} R), \quad (5)$$

где τ_n – температура на внутренней поверхности n -ого слоя ограждения (нумерация слоев принимается от внутренней поверхности ограждения), °С; $\sum_{n-1} R$ – сумма термических сопротивлений $(n-1)$ слоев ограждения, м²·°С/Вт (найденные нами значения приведены в табл. 1); R_0 – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м²·°С/Вт; t_g – расчетная температура внутреннего воздуха, °С; t_n – расчетная температура наружного воздуха, °С.

Таблица 1. Термическое сопротивление замкнутых воздушных прослоек без отражательной теплоизоляции

Толщина воздушной прослойки, м	Термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки, $R_{в.п.}$, м ² ·°С/Вт	
	при температуре воздуха в прослойке	
	положительной	отрицательной
0,01	0,13	0,15
0,02	0,14	0,15
0,03	0,14	0,16
0,05	0,14	0,17
0,1	0,15	0,18
0,15	0,15	0,18
0,2 – 0,3	0,15	0,19

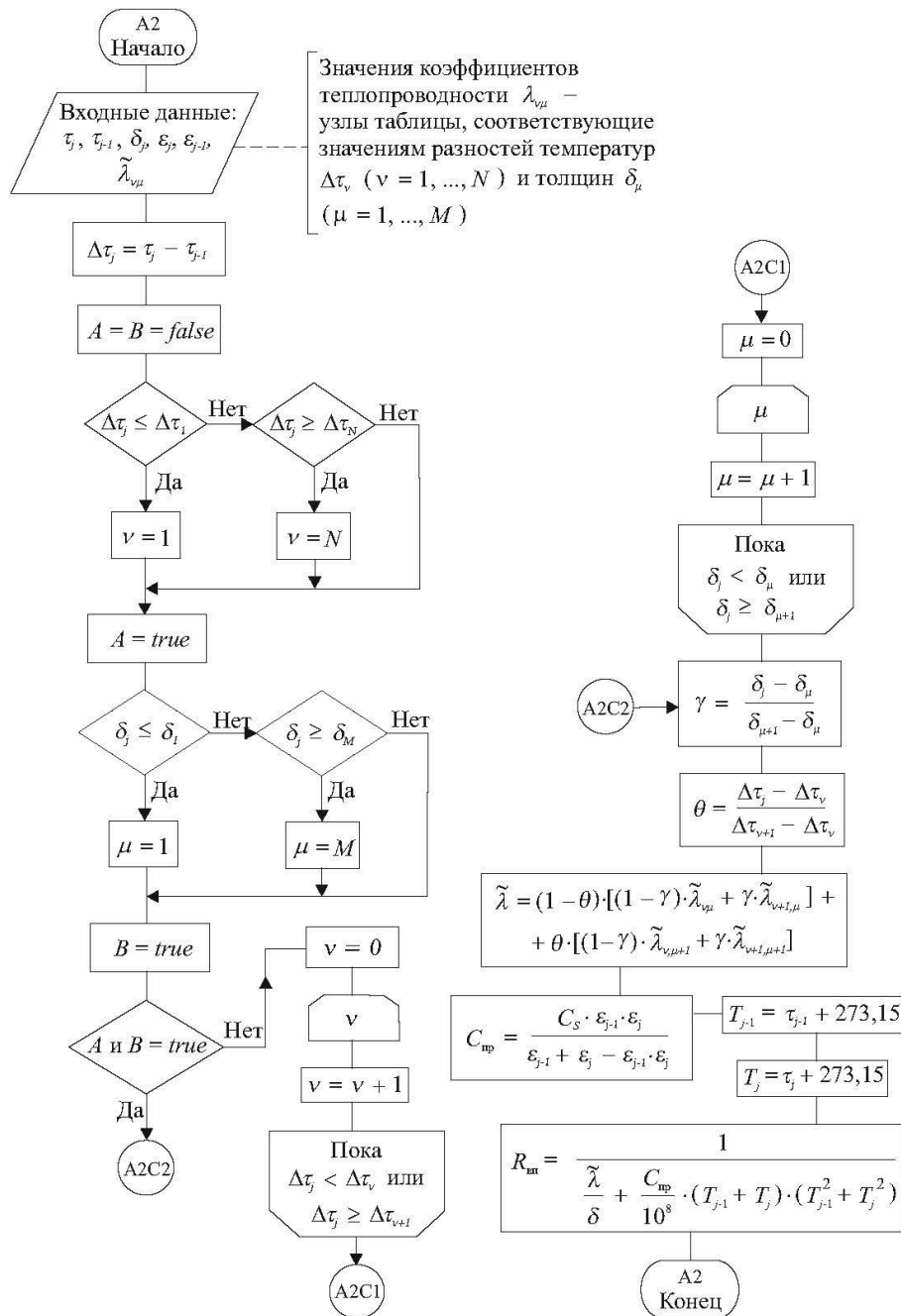


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета сопротивления теплопередаче замкнутой воздушной прослойки с учетом коэффициентов отражения

Поток теплоты, передаваемый через воздушную прослойку за счет излучения, с учетом температур на поверхностях воздушной прослойки и принятых коэффициентов излучения поверхности, определяют по формуле [2]:

$$q_{изл.} = C_{np.} \left[\left(\frac{\tau_{1в.п.} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\tau_{2в.п.} + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (6)$$

где $C_{np.}$ – приведенный коэффициент излучения. Его находят по формуле:

$$C_{np.} = \frac{1}{\frac{1}{C_{1в.п.}} + \frac{1}{C_{2в.п.}} - \frac{1}{C_0}}, \quad (7)$$

где $C_{1в.п.}$ и $C_{2в.п.}$ – коэффициент излучения одной и другой поверхности воздушной прослойки, $Вт/м^2К^4$; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, [$Вт/м^2К^4$], равный 5.67 [$Вт/м^2К^4$].

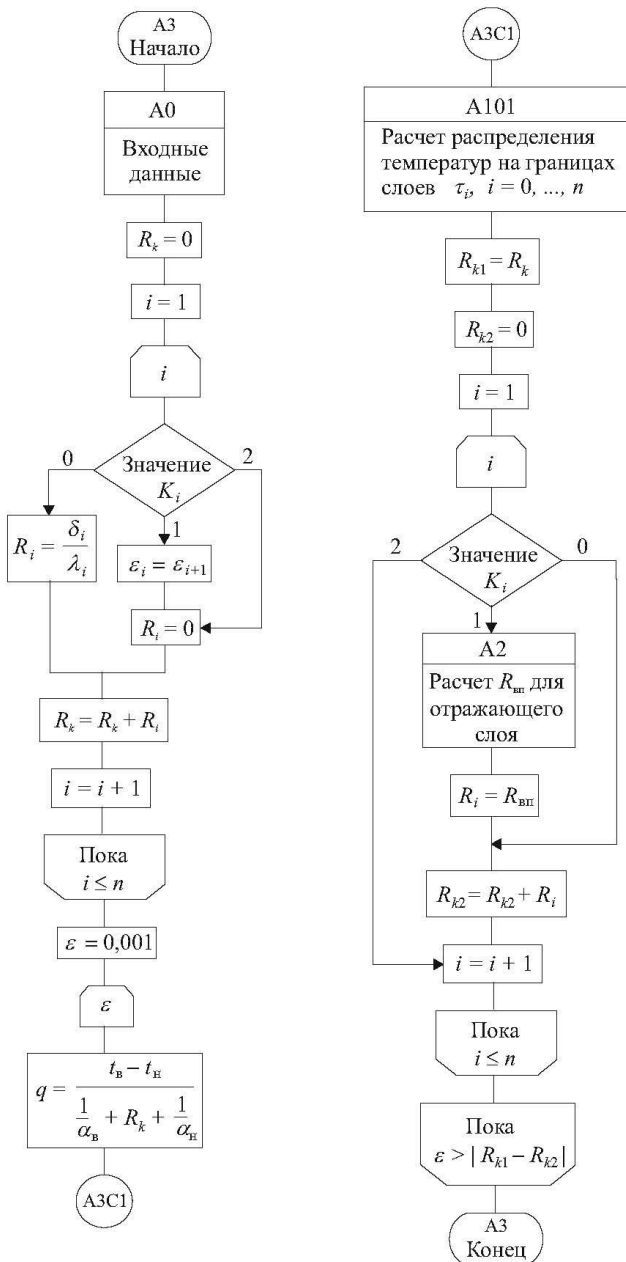


Рис. 5. Блок-схема алгоритма расчета сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, содержащей воздушные прослойки и отражательную изоляцию

многослойных конструкций возможна внутренняя конденсация влаги, что может приводить к размножению опасных биологических культур и даже приводить к разрушению ограждения.

В условиях Российской Федерации температура и влажность в помещении обычно выше, чем на улице, поэтому в большинстве случаев влагоперенос направлен в сторону наружной части ограждения. Конденсация влаги внутри ограждения возникает, если температура в определенном сечении ограждения достигла температуры конденсации, которая, в свою очередь, зависит от парциального давления водяного пара.

Приведенные формулы соответствуют случаю, когда площадь ограждения равна площади нагревателя и они расположены параллельно друг другу. С учетом формы, взаимного расположения и площади излучающих поверхностей формула для радиационного теплообмена $q_{изл.}$ в условии (4) имеет вид (см. [2, 1, 7]):

$$q_{изл.} = \frac{C_s F_1 \varphi_{1-2} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{Rq + T_-}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{T_n} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{T_c} - 1 \right)}, \quad (8)$$

где F_1, F_2 – площади излучающей и поглощающей поверхности, m^2 ; $\varphi_{1-2} \leq 1$ коэффициент облученности поглощающей поверхности, в нашем случае он равен единице.

Блок-схемы алгоритмов теплотехнического расчета полнотельных строительных конструкций и ограждений с использованием воздушных прослоек с отражательной изоляцией представлены на рис. 2, 3, 4, 5. Как видно из блок-схем, расчеты конструкций с учетом коэффициентов излучения поверхностей значительно сложнее.

На рис. 6 показан результат расчета конструкции с отражательной теплоизоляцией [8].

Многослойные конструкции могут проявлять различных характер влагопереноса в зависимости от теплопроводности отдельных слоев и их взаимного расположения. В неблагоприятном случае внутри

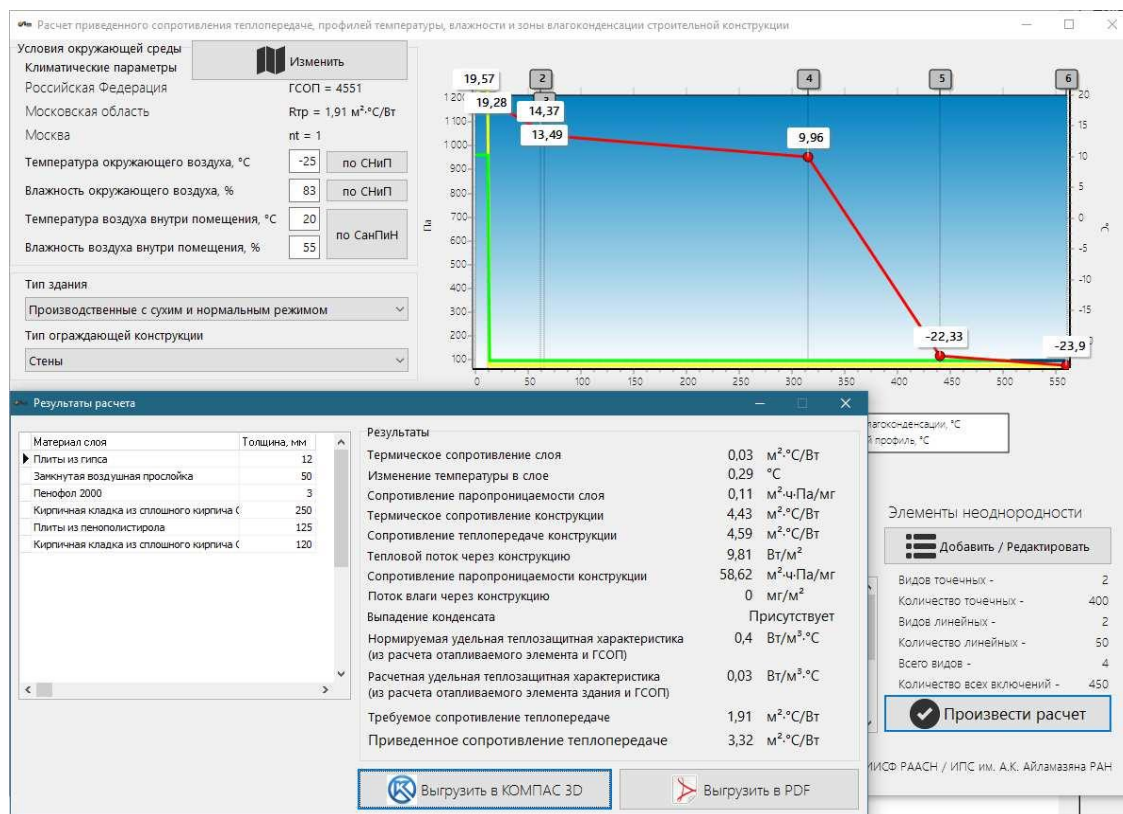


Рис.

Рис. 6. Интерфейс пользователя. Результаты расчета

Ограждение может включать пленку из материала, не пропускающего пары воды (алюминиевая фольга, полиэтилен). Такой слой практически не создает теплового сопротивления, но приводит к тому что профиль давления паров водяного пара становится ступенчатым. С каждой стороны такой пленки давление паров постоянно и равно давлению на соответствующей границе ограждения. Влагоконденсация внутри ограждения возникает, если высокая концентрация влаги оказывается в сечении с достаточно низкими температурами. Для устранения возможности возникновения этого явления слои с низкой паропроницаемостью должны быть смещены в зону высоких температур и паронепроницаемый слой, расположенный в зоне высоких температур, с повышенным давлением водяного пара предохраняет ограждение от влагоконденсации.

Если ограждение включает воздушную прослойку, то она не представляет сопротивления влагопереносу, но имеет значительное тепловое сопротивление, поэтому влагонепроницаемый слой следует укреплять на “теплой” стороне воздушной прослойки.

Результаты. Полученные алгоритмы моделирования теплопереноса, учитывают влагопроводность материалов, позволяют определить сопротивление диффузии водяных паров конструкции, возможные зоны влагоконденсации в ее сечении, реализованы в пакете прикладных программ LIT THERMO ENGINEER (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2014617857) [5, 6, 9], который доступен на сайте <http://zavodlit.ru/>.

Автор выражает искреннюю благодарность за обсуждение результатов работы и постановку задач исследования Цирлину А. М., Умняковой Н. П., Цыганкову В. М.

Библиографический список

1. Ахременков А.А., Кузьмин В.А., Цирлин А.М., Цыганков В.М. Энергетическая эффективность покрытия внутренней поверхности помещений отражательной теплоизоляцией // Строительные материалы. декабрь 2013

2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). М.: Высшая школа. 1982. 415 с.
3. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат. 1979. 248 с.
4. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учеб. // 3-е изд. М. : АВОК Северо-Запад. 2006. 400 с.
5. Бузало Н.А., Чернышкова И.А. Использование информационных технологий для формирования профессиональных компетенций будущих строителей // Сборник докладов на конференции «Місто. Культура. Цивілізація». Харків. Квітень. 2015.
6. Лебединская А.Р. Современные программные средства для проектирования тепловой защиты здания с учетом требований энергосбережения и энергоэффективности // Перспективы развития строительного комплекса. 2015 №1. С. 49 –54.
7. Умнякова Н.П. Теплопередача через ограждающие конструкции с учетом коэффициентов излучения внутренних поверхностей помещения // Жилищное строительство. 2014. № 6. С. 14-17.
8. Умнякова Н.П., Цыганков В.М., Кузьмин В.А. Экспериментальные теплотехнические исследования для рационального проектирования стеновых конструкций с отражательной теплоизоляцией // Жилищное строительство. 2018. № 1-2. С. 38-42.
9. Цыганков В.М. Современные инструменты для расчета тепловой оболочки здания // Все о ЖКХ. 2015, №1 (25).

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое моделирование и оптимизация в задачах САПР, аддитивных технологий, цифрового производства

<i>Белов В.Д.</i> Моделирование процедур процесса формирования типовых программ диагностики котельного оборудования.....	3
<i>Кузьмин В.А.</i> Алгоритмическое и программное обеспечение расчета строительных ограждений, содержащих отражательную изоляцию.....	8
<i>Маишунин Ю.К.</i> Оптимальное проектирование во взаимосвязи техническая система (ТС) – Материалы (Практика. Моделирование ТС).....	15
<i>Лещенко С.Л., Попов Д.В., Непомнящий Д.О.</i> Математическая модель трассы лидара.....	21

Математические методы и интеллектуальные системы в робототехнике и мехатронике

<i>Ковалёв Д.А., Юдин Д.А.</i> Распознавание сигналов секций светофора на основе анализа цветовых пятен на изображении	25
<i>Бажанов А.Г., Бушуев Д.А., Пикалов А.С., Алексеевский С.В.</i> Моделирование сенсорной подсистемы автоматически управляемого транспортного средства для складских систем	30
<i>Порхало В.А., Рубанов В.Г., Костин С.В.</i> Моделирование системы управления перемещением роботизированной платформы с применением ADAMS и MATLAB	36
<i>Пушкарев И.А., Пушкарева Т.А.</i> Исследование структуры и динамики зубчато-роликковой планетарной передачи.....	40
<i>Жвалецкий О.В.</i> Концептуальная модель математической обработки тензотренограмм.....	44

Математические методы в экономике и гуманитарных науках

<i>Калабин А.Л., Боброва Е.И.</i> Полярные индексы как оценка динамики состояния региона	51
<i>Калабин А.Л., Туляков А.В.</i> Программная система для анализа текстов.....	55
<i>Калабин А.Л.</i> Оценка связанности текста методами компьютерной лингвистики	59
<i>Федосеев А.А.</i> Технология когнитивного электронного учебника	64
<i>Капусто А.В., Крушевский Е.А., Кузнецова А.А., Хотомцева М.А.</i> Реализация принципа наглядности обучения в математике на основе современных средств передачи информации	68
<i>Агаджанян А.Г.</i> Оптимальная тоновая аппроксимация монохромных изображений двухэтапным гибридным алгоритмом	73
<i>Сасин Е.А., Сидорович А.С.</i> Применение методологии AGILE и игрофикации в высшем образовании	78
<i>Сидорович А.С., Сасин Е.А.</i> Сравнительная характеристика основных метрик расстояний	82

Обсуждение квалификационных работ

<i>Мазур А.А., Большаков А.А.</i> Математическое обеспечение для учёта трения на энергетические затраты промышленного манипулятора с вращательными движениями	85
---	----

ШМУ-2 Информатизация технических систем и процессов

<i>Анашкин И.П., Казанцев С.В.</i> Моделирование ректификации методом Монте-Карло	88
<i>Гольцов Ю.А., Кижук А.С., Рубанов В.Г.</i> Энергоэффективное нагревательное устройство высокой мощности	91

Научное издание

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ**

**СБОРНИК ТРУДОВ
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Том 8

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 — научная и производственная литература

Подписано в печать __.__.2018. Формат 60x84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л.10,0. Тираж 150. Заказ 15599б.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного редколлегией,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.