

УДК 699.86

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ ШАРОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИЖедяевский Д.Н.¹, Лукьянов В.А., Мотовилин А.А., Чикичев Д.Н.

РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, г. Москва

e-mail: ¹jd@mail.ru

Аннотация. Существующие способы теплоизоляции отличаются существенным ограничением по несущей способности теплоизоляционного слоя, что сужает область их применения. Предлагается конструкция, лишенная этой проблемы: теплоизоляционный слой, выполненный в виде твердых шаровых элементов. Эффект повышения термического сопротивления слоя значительно усиливается за счет реализации точечного контакта между шаровыми элементами. В статье представлены результаты компьютерного моделирования термодинамических процессов в теплоизоляционном слое, показаны преимущества перед имеющимися аналогами.

Ключевые слова: теплоизоляция, теплопроводность, покрытие, концептуальное проектирование, точечный контакт, моделирование

В РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина на кафедре оборудования нефтегазопереработки в рамках курса «Основы концептуального проектирования технологий и техники» проводился функционально-физический анализ (ФФА) технологий, техники и изделий (технических систем – ТС) нефтегазовой отрасли. В процессе выполнения учебного задания в ТС «Теплоизоляция танков для хранения и перевозки сжиженного природного газа на судах с грузовой системой типа Kvaerner – Moss» были сформулированы следующие виды продуктивных знаний:

– техническое противоречие (ситуация, когда при попытке улучшить одну характеристику ТС, ухудшается другая его характеристика): увеличение несущей способности теплоизоляционного слоя приводит к увеличению теплового потока в теплоизоляционном слое, который в слое должен быть минимальным;

– физическое противоречие (ситуация, когда к объекту или его части, к его состоянию, свойствам, параметрам и т.п. одновременно предъявляются взаимоисключающие требования): тепловой поток при увеличении несущей способности растёт, а для увеличения теплоизоляционных свойств должен быть минимальным.

В результате разрешения сформулированных противоречий (с помощью стандартов) синтезировано техническое решение, заключающееся в том, что теплоизоляционный материал должен быть выполнен в виде насыпных слоев твердых элементов, контактирующих друг с другом с наименьшей поверхностью контакта. Было разработано конструктивно-технологическое решение, заключающееся в реализации «точечного контакта», позволяющего минимизировать теплопередачу между составными элементами конструкции при сохранении значительной несущей способности [5].

Разработанная конструкция представляет собой теплоизоляционный блок (рис. 1), состоящий из следующих основных элементов:

- стенка 1 контакта с горячим объектом;
- стенка 2 контакта с холодным объектом;
- слой 3 теплоизоляционных элементов сферической формы.

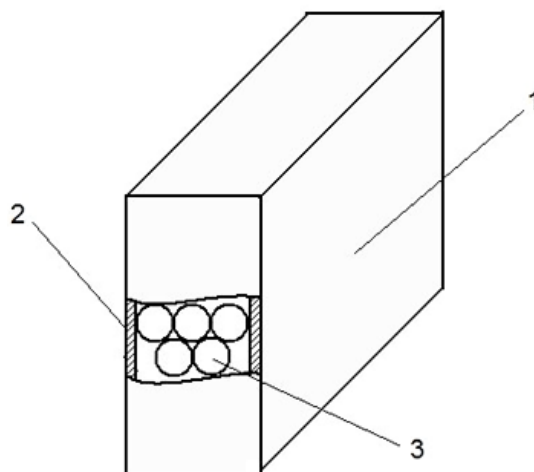


Рис. 1. Конструкция теплоизоляционного блока

При возникновении перепада температур на противоположных поверхностях теплоизоляционного блока тепловой поток поступает на стенку контакта с горячим объектом и, пройдя её, передаётся теплоизоляционному блоку. Тепловой поток проходит через теплоизоляционные элементы сферической формы, соприкасающиеся между собой, а затем – со стенкой контакта с холодным объектом. Расположение сферических теплоизоляционных элементов не менее чем в три слоя в направлении теплового потока обеспечивает повышение теплоизоляционных свойств за счет значительных местных термических сопротивлений при сохранении высокой несущей способности. При этом отсутствие жесткой связи между вышеуказанными элементами повышает гибкость теплоизоляционного элемента, а также позволяет сферическим элементам незначительно смещаться друг относительно друга в пространстве кожуха для распределения внешних нагрузок. Кроме того, отсутствие жестких связей между сферическими теплоизоляционными элементами блока позволяет эффективно минимизировать и/или компенсировать напряжения, возникающие при изменении температуры без потери формы и изменения структуры блока.

Высокие теплоизоляционные свойства разработанного покрытия обусловлены снижением интенсивности теплопередачи теплопроводностью за счет минимизации площадей поверхностей соприкосновения сферических элементов теплоизоляционного слоя. Правильная форма элементов в сочетании с малой шерохова-

тостью их поверхности, определяемой чистотой обработки, позволяют свести площади контакта к условной точке [6].

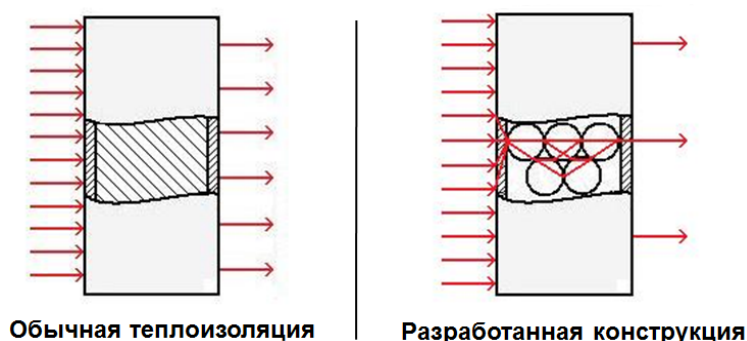


Рис. 2. Иллюстрация принципа теплоизоляции через точечный контакт

Эффективность теплоизоляции через точечный контакт опирается на основной закон теплопроводности – закон Фурье [8]. Согласно ему, количество теплоты d^2Q_τ , проходящее через элемент изотермической поверхности dF за промежуток времени $d\tau$, пропорционально температурному градиенту $\frac{\partial t}{\partial n}$:

$$d^2Q_\tau = \frac{-\lambda \cdot \partial t}{\partial n} \cdot dF \cdot d\tau.$$

Здесь множитель λ – коэффициент теплопроводности. Знак минус указывает на то, что теплота передается в направлении уменьшения температуры. Количество теплоты d^2Q_τ , прошедшее в единицу времени через единицу изотермической поверхности, называется плотностью теплового потока [2].

Кроме теплопроводности, тепло внутри теплоизоляционного слоя может передаваться лучистым теплообменом и конвекцией [1]. Интенсивность передачи тепла лучистым теплообменом внутри теплоизоляционного блока может быть снижена путём нанесения теплоотражающего покрытия (рис. 3) на внешние 1 и/или внутренние 2 поверхности кожуха теплоизоляционного блока в зависимости от интенсивности лучистого теплообмена [7].

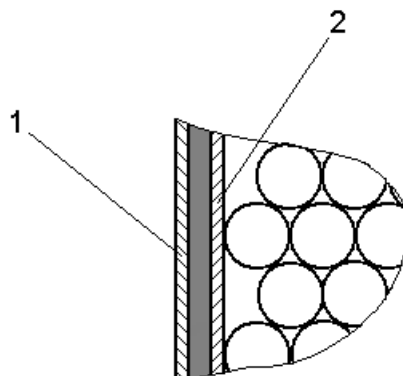


Рис. 3. Фрагмент конструкции теплоизоляционного блока с теплоотражающим покрытием

Интенсивность передачи тепла конвекцией внутри теплоизоляционного блока может быть снижена за счет закачки газа с низким коэффициентом теплопроводности или вакуумирования внутреннего пространства теплоизоляционного блока. Для этого теплоизоляционный блок должен быть снабжён патрубком с клапанным устройством.

Устойчивость формы теплоизоляционного блока может быть повышена за счет применения внутренних стяжек (рис. 4), соединяющих противоположные стенки кожуха 1, содержащего сферические теплоизоляционные элементы 2, таким образом, что в процессе эксплуатации стяжки 3 препятствуют увеличению расстояния между стенками кожуха 1 за счет ограничения осевого и радиального перемещения стенок относительно друг друга.

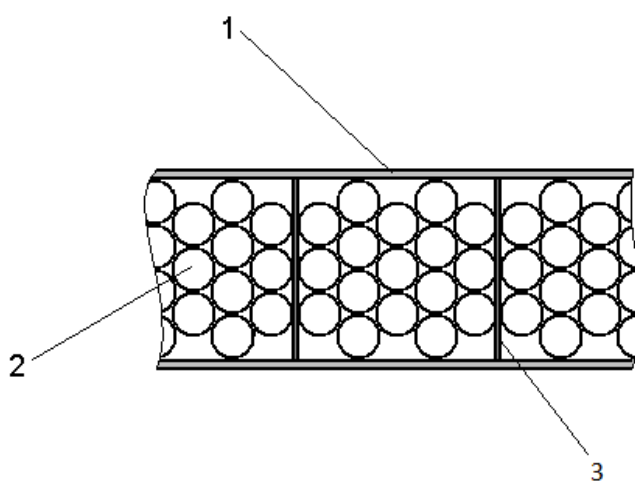


Рис. 4. Конструкция теплоизоляционного блока с внутренними стяжками

Расширение диапазона применения блока может быть достигнуто путём изготовления сферических теплоизоляционных элементов, заполняющих блок, из различных материалов в зависимости от условий внешней среды: температур, силовых нагрузок и т.д. Например (рис. 5), один слой сферических теплоизоляционных элементов, ближайший к наиболее нагретой поверхности кожуха, выполнен из теплостойкого материала (стекло), а другой – из материала с меньшей стойкостью к высоким температурам, но большим термическим сопротивлением (полиуретан, перлит).

При этом в процессе эксплуатации наиболее нагретая стенка блока 1 имеет высокую температуру, соответственно, слой сферических теплоизоляционных элементов, непосредственно соприкасающихся с этой стенкой, должен быть выполнен из материалов, сохраняющих рабочие характеристики при данной температуре. Следующий на пути теплового потока слой 2 сферических теплоизоляционных элементов, непосредственно соприкасающихся с первым, более нагретым слоем, выполняется из других материалов, сохраняющих рабочие характеристики

уже при более низких температурах и т.д. Наиболее эффективные по ограничению теплопроводности и прочностным характеристикам материалы сферических теплоизоляционных элементов могут не обладать такими характеристиками, которые позволяли бы выдерживать самые высокие температуры, поэтому наиболее нагретые слои выполняются из других материалов, более устойчивых к нагреву.

Проведён проверочный расчет повышения эффективности теплоизоляции за счет реализации «точечного контакта» средствами программного пакета SolidWorks Simulation.

Для максимально приближенного к реальным условиям моделирования термодинамических процессов построены две твердотельные 3D-модели элементов теплоизоляционного покрытия, одна из которых выполнена с теплоизоляционным слоем из сферических элементов, а другая – с теплоизоляционным слоем из сплошного материала (рис. 6). В качестве базовой модели выбрано исполнение с двойным теплоизолирующим слоем из сферических элементов. В целях моделирования выполнен единичный фрагмент конструкции, который многократным самоповторением образует теплоизоляционное покрытие любой площади. Геометрия расположения элементов в слое соответствует случаю максимально плотного заполнения пространства между стенками теплоизоляционного покрытия.

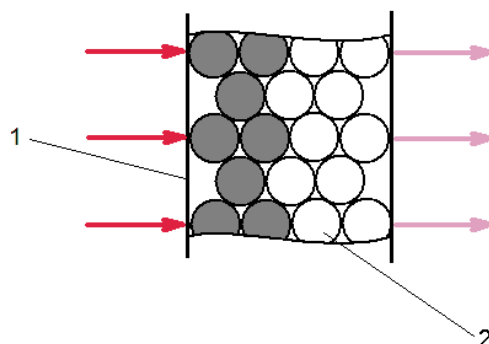


Рис. 5. Конструкция теплоизоляционного блока со слоями сферических теплоизоляционных элементов из различных материалов

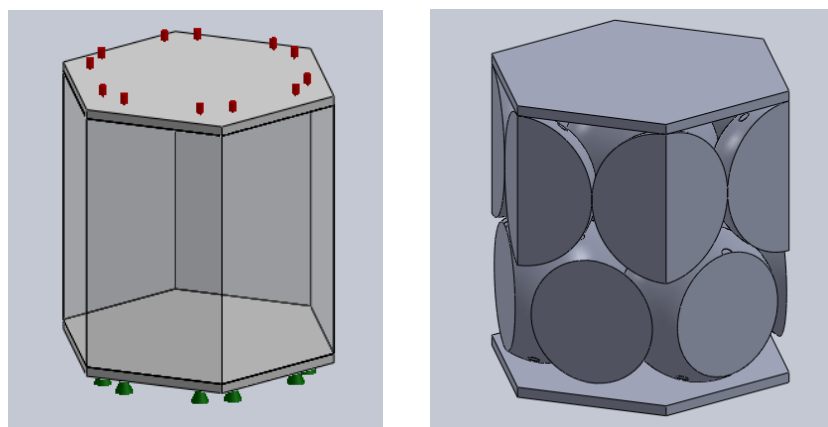


Рис. 6. 3D-модели для испытаний в среде SolidWorks Simulation

Все сферические компоненты модели (рис. 7) выполнены одинаковыми – диаметр сферической поверхности равен 15 мм. Площадки контакта (с окружающими компонентами) приняты в виде плоских круглых поверхностей площадью 1 мм² каждая.

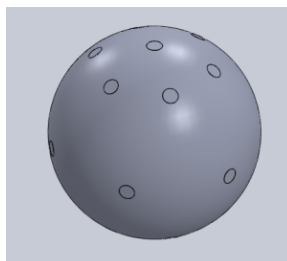


Рис. 7. 3D-модель сферического наполнителя

В качестве условий моделирования были приняты:

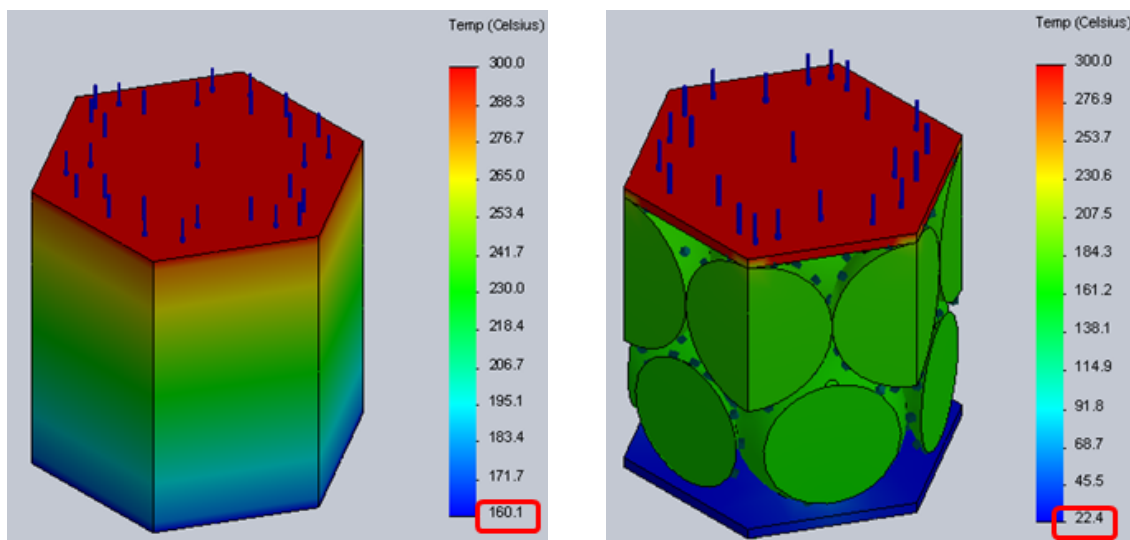
- толщина теплоизоляционного слоя 27,25 мм;
- температура наружной поверхности «горячей» стенки модели 300 °С;
- конвективный теплообмен наружной поверхности «холодной» стенки модели с окружающей средой (температура среды выбрана равной 20 °С) интенсивностью 20 Вт/(м²·°С);
- теплопередача излучением между сферическими элементами с коэффициентом 0,92 для стекла;
- коэффициент теплопроводности материала теплоизоляционного слоя (стекла) 0,760 Вт/(м·°С);
- коэффициент теплопроводности материала стенок 0,147 Вт/(м·°С);
- толщина стенок 1 мм;
- тип контакта между сферическими элементами – связанные (зазор отсутствует).

В результате моделирования получены следующие эпюры – рис. 8.

По полученным эпюрам видно, что при равных начальных условиях температуры холодных стенок моделей различаются в 7,14 раза в пользу наполнителя из сферических элементов.

Эффективность разработанной конструкции подтверждается также исследованием с применением для моделирования материала с более высокими теплоизоляционными характеристиками. В качестве наполнителя слоя из сплошного материала было выбрано минеральное волокно (минвата), достаточно часто используемое в качестве теплоизоляции, с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,056$ Вт/(м·°С). За наполнитель слоя из сферических элементов – то же стекло с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,760$ Вт/(м·°С). Т.е. коэффициенты теплопроводности материалов различаются более чем в 13,5 раз. В результате рас-

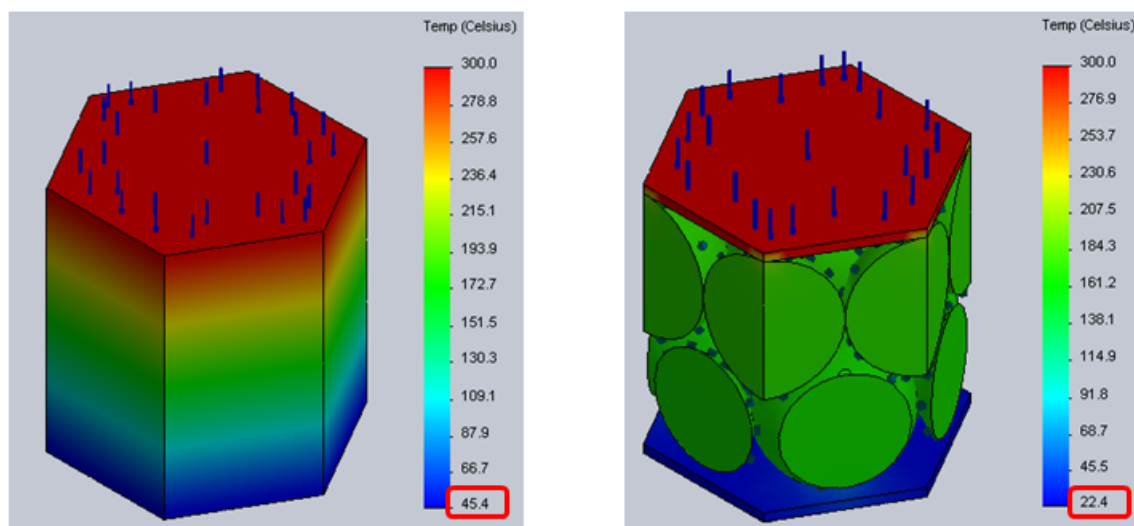
чётов программы эффективность модели из сферических элементов оказалась (при одинаковой толщине) вдвое выше модели, выполненной из сплошного слоя материала, несмотря на различие в теплоизоляционных свойствах самих материалов (рис. 9).



Наполнитель слоя – **однородное стекло**

Наполнитель слоя – **сферические элементы из стекла**

Рис. 8. Термические эпюры, полученные в результате моделирования образцов из стекла



Наполнитель слоя – минеральное волокно (минвата): $\lambda = \underline{0,056} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$

Наполнитель слоя – сфериды из стекла: $\lambda = \underline{0,760} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$

Рис. 9. Термические эпюры, полученные в результате моделирования образцов из разных материалов

Произведённый расчёт эффективности теплоизоляционного блока в программной среде SolidWorks Simulation подтвердил преимущества разработанной конструкции.

В соответствии с классической методикой расчета [3, 4] термодинамических процессов выполнен проверочный расчет термодинамической системы, смоделированной при помощи компьютерных средств. Результаты расчета подтверждают полученные данные. Расхождение полученных расчетным путем данных с результатами компьютерного моделирования составляет 0,1 %.

В настоящее время получен патент на полезную модель «Теплоизоляционный блок» (RU 119768 U1), проводится формирование лабораторного стенда для проведения термодинамических и прочностных испытаний.

Преимущества предлагаемого теплоизоляционного блока по сравнению с имеющимися аналогами:

- высокое термическое сопротивление;
- высокая несущая способность;
- гибкость;
- возможность варьировать материалы, параметры и геометрию конструкции;
- доступность материалов;
- способность слоя наполнителя распределять локальное силовое воздействие;
- адаптивность к условиям среды;
- потенциальные (исследование и моделирование не проводились) вибро- и шумоизоляция;
- долговечность, устойчивость к агрессивным средам, снижение пожароопасности и др.

Разработанная инновационная конструкция теплоизоляционного блока относится к области промышленного производства и строительства, в частности, к устройствам для обеспечения теплоизоляции и может найти применение при теплоизоляции высокотемпературных промышленных объектов (реакторов, печей), оборудования, используемого в криогенных технологиях, объектов, эксплуатируемых в районах вечной мерзлоты, в том числе с неустойчивой структурой грунта, объектов, эксплуатируемых в условиях интенсивного теплосъема, например, в водной среде.

Литература

1. Теплотехника: Учебник для втузов / А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.Н. Афанасьев и др. Под общ. ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева/ 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 712 с.
2. Поршаков Б.П., Бикчентай Р.Н., Романов Б.А. Термодинамика и теплопередача (в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности): Учебник для ВУЗов. М.: Недра, 1987. 349 с.
3. Купцов С.М., Калинин А.Ф. Лабораторная работа «Определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов методом пластины». Методические указания к лабораторной работе по курсам «Термодинамика» и «Теплотехника». М.: РГУ нефти и газа, 2003. 21 с.
4. Микаэлян Э.А. Исследование процессов теплообмена на горизонтальном трубопроводе. М.: РГУ нефти и газа, 2005. 24 с.
5. Жедяевский Д.Н., Мотовилин А.А., Чикичев Д.Н. Опыт применения элементов методики функционально-физического анализа для поиска и решения конструктивно-технологических проблем в нефтегазовом комплексе // 66-я международная молодежная научная конференция «Нефть и газ» (17-20 апреля 2012 г., Москва): Сборник тезисов докладов. Секция 4. Инженерная и прикладная механика в нефтегазовом комплексе. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. 72 с.
6. Жедяевский Д.Н., Мотовилин А.А., Чикичев Д.Н. Инновационное конструктивно-технологическое решение для промышленной теплоизоляции // 66-я международная молодежная научная конференция «Нефть и газ» (17-20 апреля 2012 г., Москва): Сборник тезисов докладов. Секция 4. Инженерная и прикладная механика в нефтегазовом комплексе. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. 72 с.
7. Тепловое излучение // Википедия – свободная энциклопедия, 2012. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Тепловое_излучение (Дата обращения: 26.07.2012).
8. Теплопроводность // Википедия – свободная энциклопедия, 2012. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Теплопроводность> (Дата обращения: 26.07.2012).

THERMAL INSULATION BASED ON SPHERICAL ELEMENTS

D.N. Zhedyayevskii¹, V.A. Lukyanov, A.A. Motovilin, D.N. Chikichev

Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

e-mail: ¹jdn@mail.ru

Abstract. Existing ways of a thermal protection are notable for essential restriction on bearing capacity of a thermal-insulation layer. This narrows area of their application. The design deprived of this problem is offered: a thermal-insulation layer comprised of solid-state spherical elements. The effect of increasing the thermal resistance of the layer is greatly enhanced through implementation of point contact between the spherical elements. In the article results of computer simulation of thermodynamic processes in the thermal-insulation layer are presented, advantages over available analogs are shown.

Keywords: SolidWorks simulation, heat transfer, thermal insulation, thermal conductivity, model technique, innovation

References

1. Arkharov A.M., Arkharov I.A., Afanas'ev V.N. et al. Teplotekhnika: uchebnik dlya vtuzov (Heat engineering. Textbook). 2 ed. Moscow, MGTU im. Baumana, 2004. 712 p.
2. Porshakov B.P., Bikchentai R.N., Romanov B.A. Termodinamika i teploperedacha (v tekhnologicheskikh protsessakh neftyanoi i gazovoi promyshlennosti): Uchebnik dlya VUZov (Thermodynamics and heat transfer (in the technological processes of the oil and gas industry). Textbook). Moscow, Nedra, 349 p.
3. Kuptsov S.M., Kalinin A.F. Laboratornaya rabota "Opredelenie koeffitsienta teploprovodnosti teploizolyatsionnykh materialov metodom plastiny". Metodicheskie ukazaniya k laboratornoi rabote po kursam "Termodinamika" i "Teplotekhnika" (Laboratory work "Determination of the thermal conductivity of insulating materials by the plate method". Laboratory operations manual for courses on "Thermodynamics" and "Heat engineering"). Moscow, RGU nefti i gaza, 2003. 21 p.
4. Mikaelyan E.A. Issledovanie protsessov teploobmena na gorizonta'nom truboprovode (The study of heat transfer processes in a horizontal pipeline). Moscow, RGU nefti i gaza, 2005. 24 p.
5. Zhedyayevskii D.N., Motovilin A.A., Chikichev D.N. Opyt primeneniya elementov metodiki funktsional'no-fizicheskogo analiza dlya poiska i resheniya konstruktivno-tekhnologicheskikh problem v neftegazovom komplekse (Experience in applying the elements of methods of the functional-physical analysis to find solutions of design and technological problems in the oil and gas sector), in *66 mezhd. molodezhnaya nauch. konf. "Neft' i gaz". Sbornik tezisov dokladov. Sektsiya 4. Inzhenernaya i prikladnaya mekhanika v neftegazovom komplekse (The 66th International young scientists conference "Oil and Gas". Book of Abstracts. Section 4. Engineering and applied*

mechanics in the oil and gas sector), 17-20 April 2012, Moscow, RGU nefti i gaza, 2012. 72 p.

6. Zhedyaevskii D.N., Motovilin A.A., Chikichev D.N. Innovatsionnoe konstruktivno-tekhnologicheskoe reshenie dlya promyshlennoi teploizolyatsii (The innovative design and technological solution for industrial thermal insulation), in *66 mezhd. molodezhnaya nauch. konf. "Neft' i gaz". Sbornik tezisov dokladov. Sektsiya 4. Inzhenernaya i prikladnaya mekhanika v neftegazovom komplekse (The 66th International young scientists conference "Oil and Gas". Book of Abstracts. Section 4. Engineering and applied mechanics in the oil and gas sector)*, 17-20 April 2012, Moscow, RGU nefti i gaza, 2012. 72 p.

7. Thermal radiation / Wikipedia, the free encyclopedia, 2012.
http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_radiation

8. Thermal conduction / Wikipedia, the free encyclopedia, 2012.
http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conduction