

УДК 662.998:665.6

## СОЗДАНИЕ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ С ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫМ КОМПОЗИЦИОННЫМ ТЕРМОБАРЬЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ ДЛЯ ПАРОТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СКВАЖИН

<sup>1</sup>Баданина Ю.В., <sup>1</sup>Комков М.А., <sup>2</sup>Бочкарев С.В., <sup>2</sup>Павловская К.В.

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, e-mail: m\_komkov@list.ru;

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, e-mail: m\_komkov@list.ru

Настоящая статья посвящена исследованию и созданию насосно-компрессорных труб (НКТ) с высокоэффективным композиционным термобарьерным покрытием для добычи высоковязкой нефти с больших глубин. Рассмотрены существующие и используемые на данный момент конструкции НКТ – «термокейсы» – трубы с вакуумированием межтрубного пространства. Создана труба НКТ с высокоэффективным композиционным теплоизоляционным покрытием из материала на основе базальтового волокна, которая позволит с минимальными потерями доставлять высокотемпературный пар (температура пара – до 420 °С и давление до 30 МПа и выше) в призабойную зону, что позволит значительно повысить уровень добычи нефти в осложненных условиях эксплуатации. Проведен сравнительный анализ существующих труб и предлагаемой модели НКТ с базальтовой теплоизоляцией по основным характеристикам, которым должны соответствовать трубы для добычи нефти паротепловым методом.

**Ключевые слова:** высоковязкая нефть, паротепловой метод нефтеотдачи, «термокейс», насосно-компрессорная труба, теплоизоляционные материалы, базальтовые волокна, метод фильтрационного осаждения, цилиндрические кольца, скорлупа

## ESTABLISHMENT OF TUBING WITH HIGH-PERFORMANCE COMPOSITE THERMAL BARRIER COATING FOR STEAM-HEAT PROCESSING WELLS

<sup>1</sup>Badanina Yu.V., <sup>1</sup>Komkov M.A., <sup>2</sup>Bochkarev S.V., <sup>2</sup>Pavlovskaya K.V.

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: m\_komkov@list.ru;

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: m\_komkov@list.ru

This article is devoted to the exploration and creation of pump-compressor pipes (TUBING) with high-performance composite thermal barrier plated heavy oil extraction from great depths. Considered existing and used at the moment construction TUBING – «thermocase» – the evacuation pipe clearance. Created pipe TUBING with high-performance composite insulating coating of basalt fiber based material that allows with minimal losses to deliver high-temperature steam (steam temperature-up to 420 °С and pressures up to 30 MPa and above) in the bottom zone, which will significantly increase the level of oil extraction in complicated conditions. Comparative analysis of the existing pipes and TUBING offered model with basalt heat insulation on the main features of which should correspond to the pipes for oil extraction steam heat method.

**Keywords:** heavy oil, paradiplomacy method of oil recovery, «thermocase», tubing, insulation materials, basalt fibers, the method of filtration deposition, cylindrical ring, shell

В настоящее время состояние сырьевой базы нефтедобывающей отрасли не только в России, но и за рубежом характеризуется значительным ухудшением структуры запасов нефти. Ввиду истощения легко извлекаемого углеводородного сырья возникла проблема поддержания сложившихся темпов добычи нефти. Одним из эффективных направлений решения указанной проблемы является освоение высоковязких трудноизвлекаемых запасов нефти. По данным открытых источников сети Интернет мировые запасы нефти средней и малой вязкости (при глубине залегания 1500 м) составляют 162,3 млрд тонн, в то же время запасы тяжелой сверхвязкой нефти (при глубине залегания порядка 3000 м) составляют 810 млрд тонн. Степень выработан-

ности запасов ВВН по России составляет не более 10% [6, 9].

При добыче тяжелой нефти с больших глубин возникает трудность, связанная с высокой вязкостью ВВН. Тяжелую нефть в ее природном состоянии невозможно выкачивать обычными методами. В большинстве случаев для того, чтобы обеспечить течение горючей жидкости подобного типа по трубопроводу, необходимо провести ее предварительное растворение или нагревание. Чаще всего применяются следующие методы повышения нефтеотдачи пластов [1, 5, 10, 13]: тепловые, газовые, химические, гидродинамические, физические.

В нашей стране тепловые методы, обладая рядом преимуществ, одним из которых

является экологичность, получили самое широкое применение (около 30%). Тепловые методы повышения нефтеотдачи пластов, в свою очередь, делятся на: паротепловое воздействие на пласт; внутрипластовое горение; вытеснение нефти горячей водой; пароциклические обработки скважин.

Одним из наиболее эффективных среди тепловых методов можно назвать способ паротеплового воздействия на пласт и пароциклические обработки скважин. Пароциклическую обработку добывающих скважин осуществляют периодическим прямым нагнетанием пара в нефтяной пласт через добывающие скважины с некоторой выдержкой их в закрытом состоянии и последующей эксплуатацией тех же скважин для отбора из пласта нефти с пониженной вязкостью и сконденсированного пара. Цель этой технологии заключается в том, чтобы прогреть пласт и нефть в призабойных зонах добывающих скважин, снизить вязкость

нефти, повысить давление, облегчить условия фильтрации и увеличить приток нефти к скважинам.

Стоит отметить, что при использовании паротепловых методов не происходит внутрипластового горения, которое связано с необходимостью принятия мер по охране окружающей среды и утилизации продуктов горения, по предотвращению коррозии оборудования.

В данный момент паротепловым методам уделяется все больше внимания. Однако существующие конструкции труб не полностью удовлетворяют производственным потребностям по уровню теплопотерь и надежности конструкции, а значит, существует проблема создания трубопроводов, способных выдерживать закачку перегретого сухого пара с заданными параметрами на большую глубину. Существует ряд причин, по которым современные трубы не применимы для добычи тяжелой нефти.

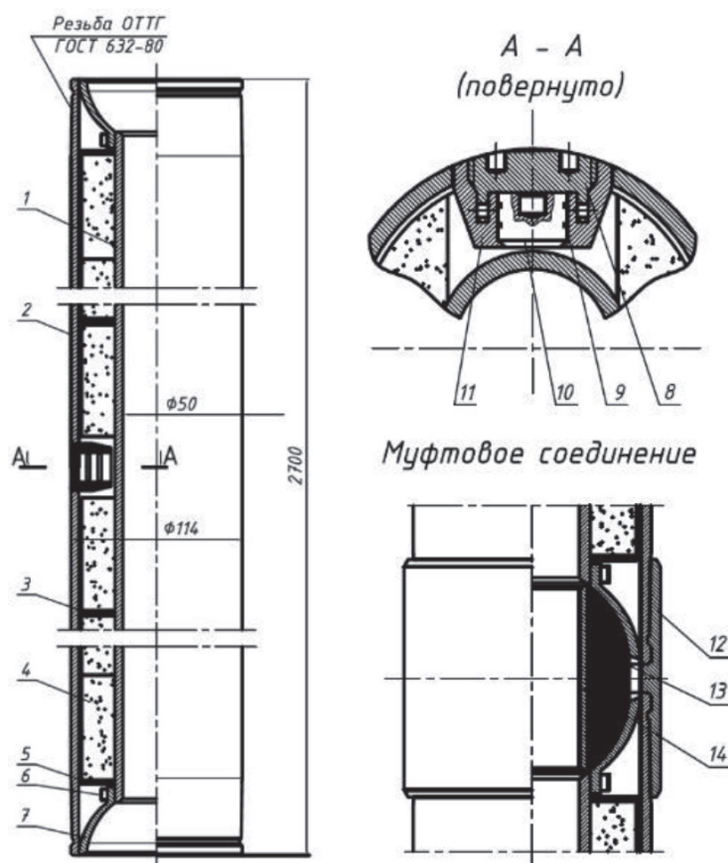


Рис. 1. Теплоизолированная труба НКТ, разработанная во ВНИИГАЗ:

1 – труба внутренняя, 2 – труба наружная, 3 – центратор, 4 – теплоизоляционный материал, 5 – кольцо опорное, 6 – поглощающий состав, 7 – диафрагма, 8 – крышка, 9 – кольцо уплотнительное, 10 – заглушка, 11 – седло, 12 – муфта, 13 – вкладыш, 14 – втулка

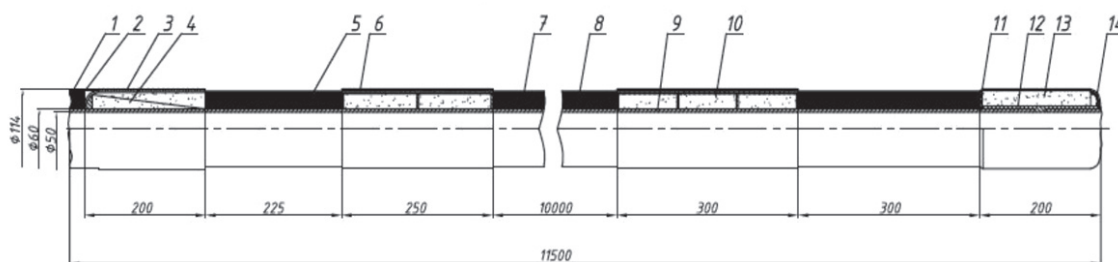


Рис. 2. Общий вид трубы НКТ: 1 – кожух из термопласта; 2 – кольцо из термоизолированного покрытия (ТИП); 3 – примотка кольца из стеклопластика (СП); 4 – секция опоры СП оболочки; 5 – регулярная часть ТИП; 6 – секция гидравлического ключа; 7 – регулярная часть НКТ (и ТИП); 8 – СП оболочки; 9 – труба НКТ; 10 – секция спайдера; 11 – кольцо стальное; 12 – муфта резьбовая; 13 – секция муфты; 14 – крышка профилированная из СП

Во-первых, невозможность существующих труб добывать ВВН с глубин выше 1500 м. Имеющиеся на сегодня термоизолированные насосно-компрессорные трубы в виде сваренных коаксиально расположенных металлических труб с вакуумированием межтрубного пространства (так называемые «термокейсы») не обеспечивают возможность применения их для глубин более 1500 метров из-за большого веса. На рис. 1 показана теплоизолированная НКТ с теплоизоляцией из открыто-пористого материала и вакуумированием межтрубного пространства, разработанная во ВНИИГАЗ [6, 10].

Во-вторых, на сегодняшний момент максимальная рабочая температура закачиваемого в нефтяные скважины пара не превышает 200–250 °С. В то же время практика добычи высоковязких и трудноизвлекаемых нефтей показывает, что температуру закачки пара в глубоко залегающие пласты необходимо повысить до 420–450 °С с переходом к пласту пара с температурой до 350–400 °С, обеспечивающей снижение эффективной вязкости нефти и растворение отложений, которые также снижают уровень добычи нефти в осложненных условиях эксплуатации [13].

В связи с вышеизложенным задача создания новых высокоэффективных теплоизолирующих систем с высокими теплоизоляционными свойствами, предназначенных для добычи сверхвязкой нефти, является весьма актуальной и востребованной промышленностью.

Создание НКТ с высокоэффективными композиционными термобарьерными покрытиями позволит с минимальными потерями доставлять высокотемпературный пар в призабойную зону, снижать степень обводненности добывающих скважин, более эффективно вести борьбу с отложениями,

что позволит значительно повысить уровень добычи нефти в осложненных условиях эксплуатации, в том числе при добыче высоковязкой и трудноизвлекаемой нефти.

Такая модель трубы, позволяющая проводить закачку пара с температурой до 420 °С и давлением до 30 Мпа, с теплоизоляцией из высокопористого материала на основе базальтового волокна, была создана совместно МГТУ им. Н.Э. Баумана и ЗАО «КОМПОМАШ-ТЭК» (рис. 2) [7].

Конструкция теплоизолированного трубопровода состоит из нескольких труб, свинчиваемых между собой непосредственно в месте эксплуатации. Каждая труба имеет основные секции:

- секция опоры СП оболочки;
- секция гидравлического ключа;
- секция спайдера;
- секция муфты для свинчивания труб между собой;
- регулярная часть НКТ.

Главным элементом НКТ с многослойным ТИП является НКТ Ø60,3×5 мм ГОСТ 633-80, материалом которой является теплоустойчивая низколегированная сталь 20ХЗМВФ. В качестве основного теплоизолирующего материала используется материал на основе короткого базальтового волокна.

Основным методом изготовления теплоизоляционного материала (ТИМ) из коротких базальтовых волокон [2] является метод фильтрационного осаждения волокон из жидкой пульпы, применяющийся при формировании теплозащитных плиток и цилиндрических колец небольшой высоты [3, 11, 12, 14]. В то же время применение длиномерных цилиндрических колец не представляется возможным, поэтому покрытие может быть выполнено только из скорлуп с последующей их сборкой в замок по образующим цилиндра (рис. 3).

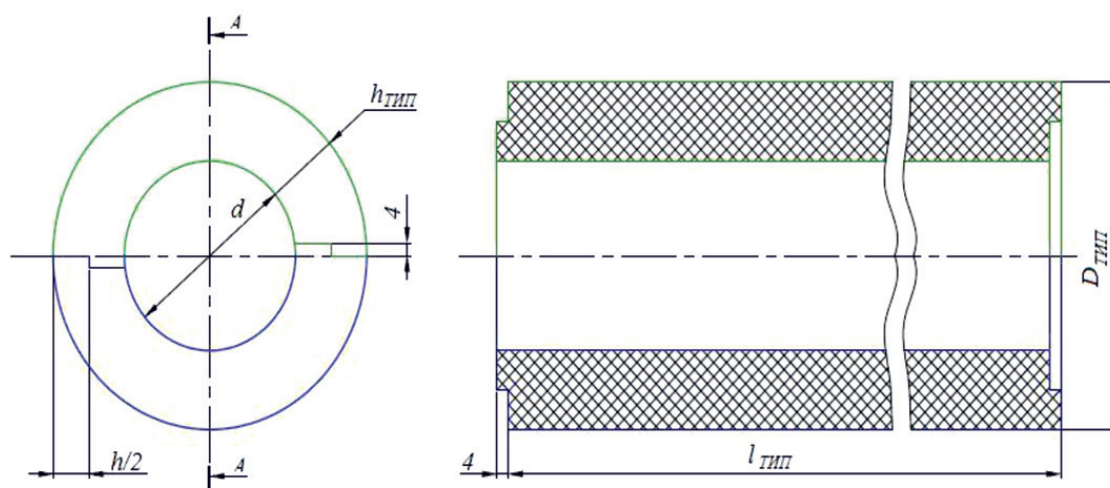


Рис. 3. Геометрия цилиндрических скорлуп из коротких базальтовых волокон;  
 $d = 60 \pm 0,2$  мм;  $l_{тип} = 255 \pm 0,1$  мм;  $h_{тип} = 25 \pm 0,1$  мм

#### Основные характеристики сравнения трубы «термокейс» с НКТ из ТИМ на основе базальтового волокна

Характеристики сравнения	Трубы с вакуумной теплоизоляцией «Термокейсы»	Предлагаемый вариант трубы с базальтовой теплоизоляцией
Глубина скважины, м	До 1500	До 3000
Max рабочая температура, °С	350	450
Погонная масса трубы, кг/м	32,3	9,7
Стоимость погонного метра трубы, \$	800	350
Температура за обсадной трубой, °С	60	60
Количество сборок-разборок	2	5
Предельный срок службы	~ 6 мес.	~ 15 мес.
Увеличение нефтеотдачи	7–10%	40–45%

Эффективность применения теплоизоляции оценивалась путем сравнения с теплоизоляцией в НКТ трубах с вакуумной теплоизоляцией. Ориентируясь на характеристики вакуумно-изолированных труб НКТ, для которых допустимой считается потеря теплового потока по длине трубы  $q_1 = 150$  Вт/м [8], можно предварительно рассчитать толщину теплоизолирующего покрытия (ТИП) из базальтовых волокон по формуле

$$q = \frac{q_1}{\pi \cdot d} = \frac{2}{d} \cdot \frac{\lambda_{тип} \cdot (T_1 - T_2)}{\ln \frac{d + 2 \cdot h_{тип}}{d}}, \quad (1)$$

где  $d = 60$  мм – наружный диаметр НКТ;  $\lambda_{тип}$  – среднее значение коэффициента теплопроводности базальтового покрытия в диапазоне температур ( $T_1 - T_2$ );  $T_1 = 400$  °С – температура на внутренней

стенке трубы НКТ;  $T_2 = 60$  °С – температура на наружной стороне покрытия трубы НКТ;  $h_{тип}$  – толщина теплоизоляции НКТ.

Считая, что пористость  $\varepsilon = V_{пор} / V_{тип} = 0,92 \dots 0,93$ , найдем среднее значение коэффициента теплопроводности материала покрытия:

$$\lambda_{тип}^{cp} = (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_{бв}^{cp} + \varepsilon \cdot \lambda_{возд}^{cp} = 0,0408 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}. \quad (2)$$

Подставив  $\lambda_{тип}^{cp}$  из (2) в (1), определим толщину теплоизоляции для трубы НКТ:  $h_{тип} = 25$  мм. Разработанный теплоизоляционный материал имеет плотность  $\rho_{тип} = 195$  кг/м<sup>3</sup> и прочность на сжатие при 10%-й деформации, равную 0,42 МПа.

Погонную массу теплоизоляции трубы НКТ из базальтовых волокон и защитной



оболочки из намотанного стеклопластика определим по формулам:

$$M_{\text{тип}} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{\text{тип}}^2 - d_{\text{НКТ}}^2) \cdot \rho_{\text{тип}};$$

$$M_{\text{сп}} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сп}}^2 - d_{\text{тип}}^2) \cdot \rho_{\text{сп}}, \quad (3)$$

где  $d_{\text{тип}} = 110$  мм – наружный диаметр теплоизоляции;  $d_{\text{НКТ}} = 60$  мм – диаметр трубы НКТ;  $D_{\text{сп}} = 114$  мм – диаметр стеклопластиковой оболочки;  $\rho_{\text{сп}} = 2,05$  кг/м<sup>3</sup> – плотность стеклопластика. Подставив числовые значения в формулы (3), получим:  $M_{\text{тип}} = 1,44$  кг/м, масса стеклопластиковой оболочки с герметизирующим слоем  $M_{\text{сп}} = 1,47$  кг/м, что в сумме с погонной массой стальной трубы НКТ диаметром 60 мм, равной 6,8 кг/м, составит 9,7 кг/м. Это, соответственно, в 2,02 и 3,33 раза меньше погонной массы труб НКТ с вакуумной теплоизоляцией [4]. Основные характеристики сравнения трубы с вакуумной теплоизоляцией и трубы с базальтовой теплоизоляцией приведены в таблице.

Сравнительный анализ по основным характеристикам, которым должны соответствовать трубы НКТ (рабочая температура, глубина скважины, погонная масса трубы, температура за обсадной трубой и т.д.), показал, что предложенная конструкция теплоизолированного трубопровода с композиционным покрытием из материала на основе базальтового волокна, отвечает всем необходимым техническим требованиям. Обеспечивает надежность работы при заданных тепловых и механических нагрузках. Применение данной конструкции для добычи тяжелой нефти оправдано благодаря снижению массы изделия в целом, вследствие чего появляется возможность добычи нефти с больших глубин.

### Заключение

Для паротепловой добычи трудноизвлекаемой нефти, залегающей на глубине свыше 1000–2000 метров, предложена конструкция трубы НКТ с высокоэффективным композиционным термобарьерным покрытием из материала на основе базальтового волокна, которая по своим характеристикам превосходит существующие на сегодняшний день трубы.

*Исследование выполнено при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» по программе «УМНИК-2015» по договору № 7159ГУ2/2015 от 03.08.2015 г.*

### Список литературы

1. Амелин И.Д., Сургучев М.Л., Давыдов А.В. Прогноз разработки нефтяных залежей на поздней стадии // Недра. – 1994. – С. 308.

2. Базальтовое супертонкое волокно «MINOL» [Электронный ресурс] // Нижегородский завод тепло- и звукоизоляционных материалов. Режим доступа: <http://uteplitel-minol.ru/holst/> (дата обращения: 27.02.2015).

3. Джигрис Д.Д., Волинский А.К., Козловский П.П. Основы технологии получения базальтовых волокон и их свойства // Базальтовые волокнистые композиционные материалы и конструкции. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 81.

4. Комков М.А., Баданина Ю.В., Тимофеев М.П. Разработка и исследование термостойких покрытий трубопроводов из коротких базальтовых волокон [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. – Вып. 2; Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1203.htm> (дата обращения: 01.03.2015).

5. Крянев Д.Ю., Жданов С.А. Применение методов увеличения нефтеотдачи пластов в России и за рубежом. Опыт и перспективы // Бурение и нефть. Специализированный журнал. – 2011. Режим доступа: <http://burneft.ru/archive/issues/2011-02/8>.

6. Кудинов В.И. Основы нефтегазопромыслового дела // Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. – 2004. – С. 720.

7. Пат. на полезную модель 121855 Российская Федерация. Труба теплоизолированная / Моисеев В.А., Моисеев А.В., Фролов В.И., Комков М.А.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Компомаш – ТЭК». – № 2012128161; заявл. 06.07.12; опубл. 10.11.12, Бюл. № 31. 3 с.

8. Пат. 2129202 Российская Федерация. Теплоизолированная колонна (термоизолированная труба НКТ) / Кудинов В.И., Богомольный Е.И., Завьялов М.П., Багиров Г.Р.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Удмуртнефть». – № 97114110/03; заявл. 12.08.97; опубл. 20.04.99, Бюл. № 4. 9 с.

9. Сургучев Л.М. Увеличение нефтеотдачи пластов: статус и перспективы // Материалы II Международного научного симпозиума. – 2009. – С. 62–69.

10. Сучков, Б.М. Добыча нефти из карбонатных коллекторов. – Москва – Ижевск: РХД, 2005. – С. 686.

11. Тарасов В.А., Смирнов Ю.В., Тимофеев М.П., Филимонов А.С. Режимы фильтрационного осаждения элементов теплозащиты РКТ // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2007. – № 5. – С. 52–55.

12. Филимонов А.С., Тарасов В.А., Комков М.А., Моисеев В.А., Тимофеев М.П., Герасимов Н.В. Экспериментальный анализ свойств перспективных теплоизоляционных материалов машиностроения, полученных методом фильтрационного осаждения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». (Специальный выпуск № 3). – 2012. – С. 175–184.

13. Шелепов В.В. Состояние сырьевой базы нефтяной промышленности России / Повышение нефтеотдачи пластов. – 2008. – № 4. – С. 43–67.

14. Komkov M.A. Rheological Properties of Polymer Binders Used in the Windings of Products of Composite Materials // Polymer Science Series D. – 2013. – vol. 6. iss. 1. – P. 26–30.

### References

1. Amelin I.D., Surguchev M.L., Davydov A.V. Prognoz razrabotki nefijanyh zalezhej na pozdnej stadii // Nedra. 1994. pp. 308.

2. Bazaltovoe supertonkoe volokno «MINOL» [Elektronnyj resurs] // Nizhegorodskij zavod teplo- i zvukoizoljacionnyh materialov. Rezhim dostupa: <http://uteplitel-minol.ru/holst/> (data obrashhenija: 27.02.2015).

3. Dzhigris D.D., Volynskij A.K., Kozlovskij P.P. Osnovy tehnologii poluchenija bazaltovyh volokon i ih svojstva // Bazaltovye voloknistye kompozicionnye materialy i konstrukcii. Kiev: Naukova dumka, 1980. pp. 81.

4. Komkov M.A., Badanina Ju.V., Timofeev M.P. Razrabotka i issledovanie termostojkij pokrytij truboprovodov iz

korotkih bazaltovyh volokon [Elektronnyj resurs] // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2014. Vyp. 2; Rezhim dostupa: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1203.htm> (data obrashhenija: 01.03.2015).

5. Krjanev D.Ju., Zhdanov S.A. Primenenie metodov uvelichenija nefteotdachi plastov v Rossii i za rubezhom. Opyt i perspektivy // Burenje i nef. Specializirovannyj zhurnal. 2011. Rezhim dostupa: <http://burneft.ru/archive/issues/2011-02/8>.

6. Kudinov V.I. Osnovy neftegazopromyslovogo dela // Moskva-Izhevsk: Institut kompjuternyh issledovanij. 2004. pp. 720.

7. Pat. na poleznuju model 121855 Rossijskaja Federacija. Truba teploizolirovannaja / Moiseev V.A., Moiseev A.V., Frolov V.I., Komkov M.A.; zjavitel i patentoobladatel Zakrytoe akcionerное obshhestvo «Kompomash TJeK». no. 2012128161; zjavl. 06.07.12; opubl. 10.11.12, Bjul. no. 31. 3 p.

8. Pat. 2129202 Rossijskaja Federacija. Teploizolirovannaja kolonna (termoizolirovannaja truba NKT) / Kudimov V.I., Bogomolnyj E.I., Zavjalov M.P., Bagirov G.R.; zjavitel i patentoobladatel Otkrytoe akcionerное obshhestvo «Udmurtneft». no. 97114110/03; zjavl. 12.08.97; opubl. 20.04.99, Bjul. no. 4. 9 p.

9. Surguchev L.M. Uvelichenie nefteotdachi plastov: status i perspektivy // Materialy II Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma. 2009. pp. 62–69.

10. Suchkov, B.M. Dobycha nefi iz karbonatnyh kolektorov. Moskva Izhevsk: RHD, 2005. pp. 686.

11. Tarasov V.A., Smirnov Ju.V., Timofeev M.P., Filimonov A.S. Rezhimy filtracionnogo osazhdenija jelementov teplozashhity RKT // Polet. Obshherossijskij nauchno-tehnicheskij zhurnal. 2007. no. 5. pp. 52–55.

12. Filimonov A.S., Tarasov V.A., Komkov M.A., Moiseev V.A., Timofeev M.P., Gerasimov N.V. Jeksperimentalnyj analiz svojstv perspektivnyh teploizoljacionnyh materialov mashinostroenija, poluchennyh metodom filtracionnogo osazhdenija // Vestnik MGTU im. N.Je. Bauman. Ser. «Mashinostroenie». (Specialnyj vypusk no. 3). 2012. pp. 175–184.

13. Shelepov V.V. Sostojanie syrevoj bazy nefjanoj promyshlennosti Rossii / Povyshenie nefteotdachi plastov. 2008. no. 4. pp. 43–67.

14. Komkov M.A. Rheological Properties of Polymer Binders Used in the Windings of Products of Composite Materials // Polymer Science Series D. 2013. vol. 6. iss. 1. pp. 26–30.