

УДК 553:622.248.33

**А. К. Судаков, О. Е. Хоменко, доктора технических наук, Д. А. Судакова¹;
А. Ю. Дреус², канд. техн. наук**

¹Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,
г. Днепр, Украина

²Днепропетровский национальный университет им. О.Гончара, Украина

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ КРИОГЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЛИКВИДАЦИИ ПОГЛОЩЕНИЯ В БУРОВОЙ СКВАЖИНЕ

Осуществлена физическая и математическая постановка задач. Разработана математическая модель и выполнено теоретическое исследование процессов теплопереноса в слое горной породы вокруг скважины при действии на стенки скважины криогенного (низкотемпературного) хладагента. Представлена динамика температурного поля в горной породе и исследована зависимость времени процесса замораживания от мощности замороженного слоя. Получены аналитические выражения для оценки параметров процесса формирования защитного инверсно-криогенного экрана в поглощающем горизонте буровой скважины при применении инновационной криогенной технологии ликвидации поглощения промывочной жидкости.

Ключевые слова: скважина, ликвидация поглощения, криогенная технология, теплоперенос, аналитическое исследование.

Постановка проблемы. Процесс бурения скважин сопряжен с геологическими осложнениями. Одним из наиболее распространенных осложнений является поглощение промывочной жидкости. На ликвидацию поглощений затрачивается значительная доля времени и средств, расходуемых на сооружение скважины.

В настоящее время не существует надежных технологий ликвидации такого вида осложнения. Эффективность применения таких технологий и материалов не превышает 70%.

Обзор последних исследований и публикаций по данной проблеме. Причины, вызывающие поглощение промывочных жидкостей в скважинах, и анализ методов борьбы с этим явлением подробно рассмотрены в [1].

Поглощение промывочной жидкости значительно дешевле предупредить, чем ликвидировать. Исследованиям в области разработки технологий предупреждения и борьбы с поглощениями промывочной жидкости посвящено множество работ.

Предупреждение поглощений промывочной жидкости может быть реализовано путем регулирования свойств промывочной жидкости, а также (или) уменьшения перепада давления на поглощающий горизонт [2; 3], хотя эти технологии имеют ограниченную в известном смысле область применения и в большинстве случаев малоэффективны.

Ликвидация поглощений обеспечивается тампонированием каналов отхода промывочной жидкости твердеющими или нетвердеющими тампонажными смесями путем создания водонепроницаемого экрана в породе вокруг скважины.

В настоящее время разработано большое количество технологий и технических средств, предназначенных для ликвидации поглощения промывочной жидкости. Отличительной их особенностью является применение малоэффективных тампонажных материалов на водной основе с введением в их состав минераловязущих или синтетических веществ. Подтверждением этого могут служить данные исследований в работах А. И. Булатова, Л. М. Ивачева, Э. Я. Кипко, В. И. Крылова, Н. К. Липатова, М. А. Мыслюка, Ю. А. Полозова, И. И. Рафиеко, Ю. Н. Спичака, Н. И. Титкова, П. М. Тяна, А. М. Яковлева, В. Г. Ясова и др. [1].

Наиболее распространенным методом изоляции поглощающих горизонтов является заполнение каналов поглощения тампонажными растворами у которых тампонажный камень получают за счет явления гидратации вяжущего вещества. К таким тампонажным растворам можно отнести композиты на цементной основе.

Значительным недостатком цементных растворов является изменение их параметров на контакте со скважинной жидкостью (промывочная жидкость, флюид). При контакте со скважинной жидкостью, происходит разубоживание цементного раствора, его седиментация, обуславливающая невозможность или снижение эффективности изоляции поглощающего горизонта, что приводит к необходимости повторения операций по цементированию поглощающего горизонта буровой скважины.

На кафедре техники разведки месторождений полезных ископаемых Национального горного университета (г. Днепр, Украина) накоплен значительный опыт разработки и внедрения в производство нетрадиционных технологий изоляции поглощающих горизонтов. В разные периоды времени, под руководством: А. М. Бражененко, разработаны технологии изоляции поглощающих горизонтов нетвердеющими смесями на битумной основе и термопластичными материалами на основе серы [1]; Ю. Л. Кузина разрабатывает технологию тампонирувания поглощающих горизонтов, основанная на применении тампонажного материала, у которого в качестве вяжущего вещества применяется переработанные бытовые отходы [4].

Цель настоящей статьи – разработать методику расчета параметров формирования защитного инверсно-криогенного экрана в поглощающем горизонте буровой скважины при применении инновационной криогенной технологии ликвидации поглощения промывочной жидкости.

Изложение основного материала. В настоящей работе предложена новая нетрадиционная эффективная технология [5] ликвидации поглощения промывочной жидкости основанная на применении традиционных тампонажных материалов, в которой за счет введения новой технологической операции:

- достигается повышение качества изоляции поглощающих горизонтов независимо от степени проницаемости, размеров, обводненности и ориентации в пространстве каналов поглощения;

- обеспечивается равномерное распределение задавливаемых тампонажных смесей в поглощающий горизонт и за счет этого повышается эффективность и качество изоляционных завес.

Технический результат достигается тем, что способ тампонирувания скважин (рис. 1), который включает приготовление тампонажного материала, его транспортировку по стволу скважины к поглощающему горизонту, задавливание смеси в горизонт (формирование изоляционной оболочки), ожидание ее затвердения в горизонте, отличается тем, что процесс изоляции проницаемого горизонта тампонажными смесями осуществляется под защитой созданного в проницаемом горизонте по низкотемпературной технологии инверсно-криогенного экрана.

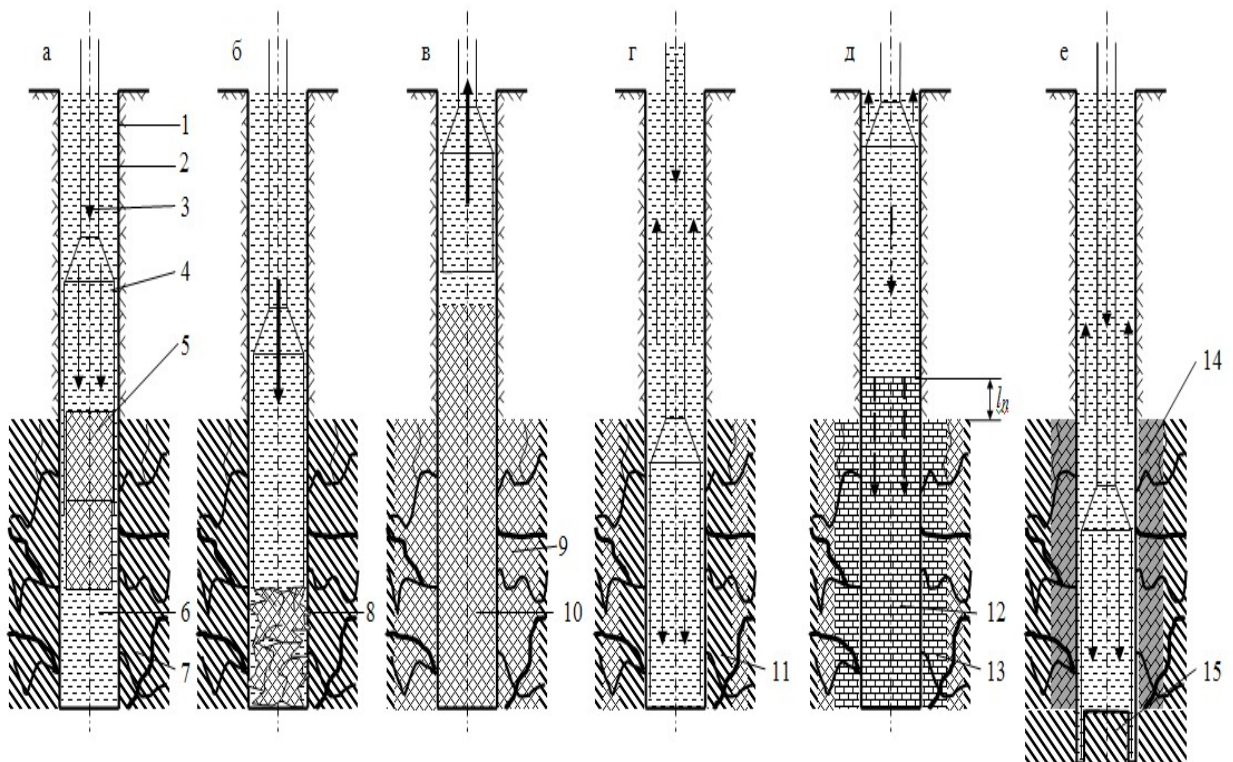


Рис. 1. Схемы технологии изоляции поглощающих горизонтов: а – доставка в скважину контейнеров с хладагентом; б – разрушение контейнеров; в – формирование инверсно-криогенного экрана в зоне поглощения промывочной жидкости; г – разбуривание ледово-песчаного композита в скважине с дальнейшим частичным растеплением проницаемого горизонта; д – задавливание тампонажной смеси; е – бурение скважины; 1 – стенки скважины; 2 – бурильная колонна; 3 – промывочная жидкость; 4 – колонковые трубы; 5 – контейнеры с хладагентом; 6 – скважина; 7 – поглощающий горизонт; 8 – разрушенные контейнеры; 9 – замороженный горизонт; 10 – замороженный ствол скважины; 11 – частично растепленный горизонт; 12 – тампонажный раствор в стволе скважины; 13 – тампонажный раствор в растепленной зоне поглощающего горизонта; 14 – тампонажный камень; 15 – керн

Благодаря применению предложенной технологии тампонирования проницаемых горизонтов обеспечиваются необходимые во времени технологические свойства как тампонажного раствора, так и камня. Кроме того, тампонирование поглощающего горизонта под защитным экраном обеспечивает: повышение качества изоляции пластов независимо от степени проницаемости пласта и размеров поглощающих каналов; существенное сокращение необходимого для изоляции объема тампонажного раствора. В целом приводит к снижению стоимости скважины и ее ремонта.

Для определения рациональных технологических параметров технологии тампонирования, создания по криогенной (низкотемпературной) технологии инверсно-криогенного экрана необходимо:

- определение длительности процесса и глубины замораживания – растепления породы;
- исследование тепловых процессов в окружающей скважину горном массиве.

Таким образом, основным отличием предлагаемой технологии от известных является то, что процесс изоляции проницаемого горизонта тампонажными смесями осуществляется

под кратковременной защитой инверсно-криогенного экрана, созданного в пронцаемом горизонте по криогенной (низкотемпературной) технологии.

Очевидно, что энергоемкость и эффективность технологического процесса во многом определяется теплофизическими процессами которые протекают при формировании инверсно-криогенного экрана. Обоснование рациональных параметров технологии требует проведения исследований теплопереноса в горной породе.

Теоретические основы методов расчета процессов теплопереноса в скважинах были разработаны М. А. Пудовкиным, А. Н. Саламатиним и В. А. Чугуновым. Развитие этих математических моделей позволило аналитически решить ряд прикладных задач по определению температурных полей в окружающей скважину горном массиве с учетом теплообмена породы и потока жидкости в скважине, например:

- разработана система подземного аккумулирования теплоносителей, обеспечивающая отопление, горячее водоснабжение и кондиционирование инженерных сооружений, которое достигается за счет сохранения летнего тепла и зимнего холода в водоносных пластах [6];

- выполнено исследование температурных полей в действующих добывающих скважинах, математическая постановка для которых приводит к необходимости решения задач сопряжения для уравнений конвективной теплопроводности с источниками [7];

- разработана общая концепция вычислительного эксперимента при теоретическом моделировании процессов тепло-массопереноса при ликвидации поглощения промывочной жидкости в скважине [8];

- разработаны математические модели изменения температурных полей в криогенно-гравийном элементе фильтра [9] в виде дифференциальных уравнений, описывающих процессы теплопереноса при выполнении технологических операций по изготовлению и оборудованию буровых скважин криогенно-гравийными фильтрами [10].

Однако при решении задачи о промерзании (растеплении) горного массива необходимо решать задачу теплопроводности с учетом фазовых превращений (задача Стефана), которая, в общем случае, не имеет точного решения [11; 12]. Таким образом, для решения задачи необходимо применять численные методы [13; 14]. Тем не менее, в первом приближении, для исследования процесса формирования инверсно-криогенного экрана при воздействии хладагента можно получить приближенное аналитическое решение.

Рассмотрим процесс теплопереноса в окружающей скважину горном массиве на этапе формирования инверсно-криогенного экрана (рис. 1, в). Ограничимся процессами переноса только в радиальном направлении и будем рассматривать горную породу как сплошное тело с постоянными теплофизическими свойствами в талом и промерзшем слое. Пренебрегаем теплотой фазового превращения. Замораживание горной породы осуществляется в результате действия на стенки скважины хладагента с температурой t_{cold} . Температурное поле в окружающей скважину горном массиве будет описываться задачей

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad a > 0, \tau > 0, R \leq r < \infty, \quad (1)$$

$$t|_{\tau=0} = t_0(z), \quad (2)$$

$$t|_{r=R} = t_{\text{cold}}, \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r \rightarrow \infty} = 0. \quad (4)$$

где t – температура; τ – время; r – радиальная координата; a – температуропроводность породы; R – радиус скважины; t_0 – начальная температура породы, которая в общем случае зависит от глубины скважины.

Введем безразмерные переменные

$$v = \frac{t - t_{\text{cold}}}{t_0 - t_{\text{cold}}} \quad \bar{r} = \frac{r}{R} \quad (5)$$

и безразмерный радиус промерзшего слоя (радиус теплового влияния)

$$l = f(F_0), \quad (6)$$

который является функцией времени, $F_0 = \frac{a\tau}{R^2}$ – безразмерное время (критерий Фурье). Для расчета параметров процесса заморозки горной породы необходимо определить вид зависимости (6).

Используя (5) и определение толщины промерзшего слоя (6), переформулируем задачу (1)–(4) в безразмерном виде для промерзшего слоя:

$$\frac{\partial v}{\partial F_0} = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \frac{\partial v}{\partial \bar{r}} \right), \quad 1 \leq \bar{r} < l(F_0), \quad (7)$$

$$v|_{F_0} = 1, \quad (8)$$

$$v|_{\bar{r}=1} = 0, \quad v|_{\bar{r}=l(F_0)} = 1, \quad \left. \frac{\partial v}{\partial \bar{r}} \right|_{\bar{r}=l(F_0)} = 0. \quad (9)$$

Для решения поставленной проблемы используем подход, предложенный в [11]. Приближенное решение задачи (7)–(8) на интервале $1 \leq \bar{r} < l(F_0)$, представим в виде

$$v = \sum_{i=1}^n b_i(F_0) f_i(\bar{r}), \quad 1 \leq \bar{r} \leq l, \quad (10)$$

где $f_i(\bar{r})$ – линейно-независимая система функций на рассматриваемом отрезке, при этом $f_0 = 0$. Потребуем, чтобы выполнялось условие

$$\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \frac{\partial f_k}{\partial \bar{r}} \right) = f_{k-1}, \quad k = 1, 2, 3, \dots; \quad (11)$$

$$f_k|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (12)$$

Решение (11) с условием (12) дает конкретный вид функций $f_i(\bar{r})$:

$$f_1 = \ln \bar{r}, \quad f_2 = \frac{1}{4}(\bar{r}^2 \ln \bar{r} - \bar{r}^2 + 1), \quad f_3 = \frac{1}{16} \left(\frac{1}{4} \bar{r}^4 \ln \bar{r} - \frac{3}{16} \bar{r}^4 + \bar{r}^2 - \frac{5}{8} \right) \text{ и т.д.}$$

Введем интегральные преобразования

$$\theta_k = \int_1^l \bar{r} f_k(\bar{r}) v(\bar{r}, F_0) d\bar{r}, \quad (13)$$

и применим к уравнению (7).

После вычисления интегралов получим систему уравнений $\frac{d\theta_k}{dF_0} = \theta_{k-1} - l f'_k(l)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, решение которой имеет вид

$$\theta_k = \sum_{i=1}^k C_i \frac{F_0^{i-1}}{(i-1)!} - \sum_{i=1}^k \frac{l f'_k(l)}{(k-i+1)!} F_0^{k-i+1}. \quad (14)$$

Ограничиваясь в (13) значением $k = 1$, получим

$$\theta_1 = -l f_1'(l) F_0 + C, \quad (15)$$

где постоянная интегрирования может быть найдена из начального условия (8):

$$C(l) = \int_1^l r f_1(\bar{r}) d\bar{r} = \frac{l^2}{2} f_1(l) - \frac{l^3}{4} f_1'(l) + \frac{1}{4}.$$

Для определения b_i в (10) используем два последних условия в (9). Таким образом, получим систему уравнений

$$b_1 f_1'(l) + b_2 f_2'(l) = 0;$$

$$b_1 f_1(l) + b_2 f_2(l) = 1,$$

решение которой дает два первых значения b_i

$$b_1 = \frac{-f_2'(l)}{f_1'(l)f_2(l) - f_2'(l)f_1(l)}, \quad b_2 = \frac{f_1'(l)}{f_1'(l)f_2(l) - f_2'(l)f_1(l)}.$$

Таким образом, приближенное решение (10) определено с точностью до второго члена ряда. Для того, чтобы определить связь между продолжительностью замерзания и толщиной промерзшего слоя воспользуемся первым интегральным преобразованием (13) и решением (15). Используя представление (10) вычислим интеграл

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \int_1^l \bar{r} f_1(\bar{r}) (b_1(l) f_1(r) + b_2(l) f_2(l)) d\bar{r} = \\ &= b_1(l) \cdot l \cdot (f_1(l) f_2'(l) - f_1'(l) f_2(l)) - b_2(l) l (f_1(l) f_3'(l) - f_1'(l) f_3(l)) \end{aligned} \quad (16)$$

Приравнявая (15) и (16) получим искомую закономерность в виде,

$$F_0 = -\frac{1}{f_1'(l)} \left[\begin{array}{l} f_2'(l) + b_2(l) \cdot l \cdot (f_1(l) f_3'(l) - \\ - f_1'(l) f_3(l)) - C(l)/l \end{array} \right]. \quad (17)$$

Решение (17) позволяет приближенно определить необходимое время процесса заморозки для формирования инверсно-криогенного экрана безразмерной толщиной l . Проведем исследование процессов теплопереноса в горной породе с использованием полученных решений (10) и (17).

На рис. 2 представлена динамика промерзания горной породы в радиальном направлении от стенки скважины при действии хладагента, рассчитанная с использованием (10).

Обозначим толщину формирующегося при заморозке породы инверсно-криогенного экрана $\delta = l - \bar{r}$.

Изменение толщины инверсно-криогенного экрана во времени происходит в соответствии с зависимостью (17) (рис. 3).

Таким образом, выражения (10) и (17) могут быть использованы для оценки параметров технологического процесса рассматриваемой технологии ликвидации поглощения промывочной жидкости.

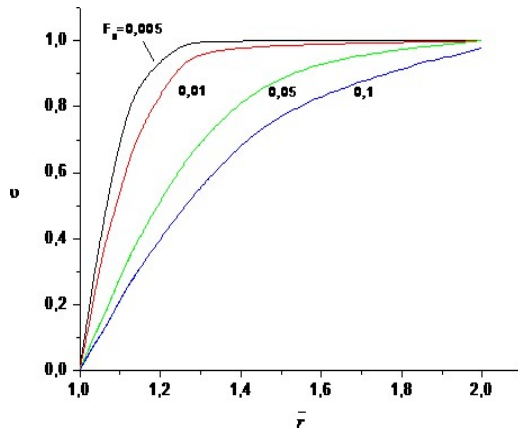


Рис. 2. Распределение по радиусу \bar{r} безразмерной температуры v в горной породе для различных значений числа F_0

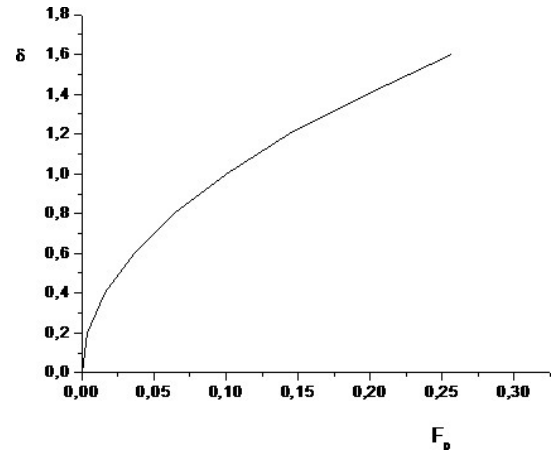


Рис. 3. Зависимость толщины инверсно-криогенного экрана δ от безразмерного времени F_0

Выводы

Получено приближенное аналитическое решение для исследования процессов теплопереноса в горной породе при формировании инверсно-криогенного экрана вокруг скважины. Установлена закономерность связывающая время заморозки горной породы с толщиной инверсно-криогенного экрана. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования технологического процесса замораживания горной породы при изоляции скважины с помощью новой высокоэффективной низкотемпературной технологии.

Здійснено фізичну і математичну постановку завдань. Розроблено математичну модель і виконано теоретичне дослідження процесів теплопереноса в шарі горної породи навколо свердловини при дії на стінці свердловини криогенного (низькотемпературного) холодагенту. Представлено динаміку температурного поля в гірській породі і досліджено залежність часу процесу заморожування від потужності замороженого горизонту. Отримано аналітичні вирази для оцінки параметрів процесу формування захисного інверсно-криогенного екрану в поглинаючому горизонті бурової свердловини при застосуванні інноваційної криогенної технології ліквідації поглинання промивальної рідини.

Ключові слова: свердловина, ліквідація поглинання, криогенна технологія, теплоперенос, аналітичне дослідження.

ANALYTICAL RESEARCH OF INNOVATIVE CRYOGENIC TECHNOLOGY OF LIQUIDATION OF ABSORPTION IN DRILLHOLE

The energy consumption of technology and its efficient depend on duration time of process and thickness of freezing layer. The paper considers the new technology plugging wells walls using freezing rock. The scheme of this technology is presented herein. It needed the investigation of temperature state of well surrounding rock massive to definite the rational parameters of the freeze impact. A mathematical model of heat transfer processes in rock massive under refrigerant impact was proposed. An approximate analytical method of calculation of temperature fields in the rock was developed. The research of the dynamics of rock temperature was conducted.

Keywords: well, elimination of absorption, cryogenic technology, heat transfer in rock, temperature field, analytical study.

Литература

1. Тампонаж горных пород при бурении геологоразведочных скважин легкоплавкими материалами / А. М. Бражененко, С. В. Гошовский, А. А. Кожевников и др. – К.: УкрГГРИ, 2007. – 130 с.
2. Чудик І. І., Богославець В. В., Дудич І. Ф. Біополімер-силікатний буровий розчин для буріння горизонтальних свердловин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2016. – № 4(61) – С. 34–43.
3. Удосконалення технології запобігання обвалувань та осипань стінок свердловини / М. І. Оринчак, І. І. Чудик, О. І. Кирчей, О. С. Бейзик // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ, – 2015. – № 2(55). – С. 35–42.
4. Kuzin J., Isakova M., Mostinets O. Isolation technology for swallowing zones by thermoplastic materials on the ba-sis of polyethyleneterephthalate // Scientific bulletin of National Mining University.– 2017. –N 1. – P. 34–39.
5. Патент на корисну модель № 106990 Україна. МПК E21B 33/10. Спосіб тампонування свердловин / А. К. Судаков, Ю. Л. Кузин Д. А. Судакова. – Заявл. 12.12.15; опубл. 10.05.16, Бюл. 9.
6. Моделирование теплопереноса в водоносном горизонте при аккумуляции и отборе тепловой энергии / И. А. Садовенко, Д. В. Рудаков, А. В. Инкин, З. Н. Якубовская // Наук. вісн. НГУ. – 2012. – № 1. – С. 40–45.
7. Михайлов П. Н., Михайлов А. П., Кульсарина Н. А. Температурное поле в скважине в асимптотическом приближении // Фундамент. исслед. – 2015. – № 6. – С. 50–53.
8. Concept of numerical experiment of isolation of absorptive horizons by thermoplastic materials / A. K. Sudakov, O. Ye. Khomenko, M. L. Isakova, D. A. Sudakova // Scient. bull. of Nat. MiningUniver. – 2016. –N. 5(155). – P. 12–16.
9. Исследование теплопереноса в криогенно-гравийном фильтре при его транспортировке по стволу скважины / А. А. Кожевников, А. Ю. Дреус, Е. Е. Лысенко, А. К. Судаков // Наук. вісн. НГУ. – 2013.–№ 6.–С. 49–54.
10. Кожевников А. А., Судаков А. К., Гриняк А. А. Гравийные фильтры с использованием эффекта двухфазного инверсного перехода агрегатного состояния вязущего вещества // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – 2008. – Вып. 11. – С. 84–88.
11. Bengt Sunden Introduction to heat transfer // WTI Press. – Southampton, Boston, 2012 – 344 p.
12. Дреус А. Ю. Математичні методи дослідження теплообміну – Д.: Вид-во ДНУ, 2013. – 130 с.
13. Schevchenko A. I. Zadacha Stefana pri nalichii konveksii[Stephen’s problem at the presence of convection / Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. – 2012. – N 1. – P.25–29.

Поступила 05.07.17