

УДК 622245.42(075.3); 519.6

**А. К. Судаков**, д-р техн. наук<sup>1</sup>; **А. Ю. Дреус**, канд. техн. наук<sup>2</sup>;  
**О. Е. Хоменко**, д-р техн. наук<sup>1</sup>; **Д. А. Судакова**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,  
г. Днепр, Украина

<sup>2</sup>Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, г. Днепр, Украина

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗОЛЯЦИИ ПОГЛОЩАЮЩИХ ГОРИЗОНТОВ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

*Исследовано температурное поле в зоне действия забойного теплового источника. Разработана общая концепция вычислительного эксперимента процессов тепло–массопереноса при ликвидации поглощения промывочной жидкости в буровой скважине с применением расплавов термопластичных материалов.*

*Осуществлена физическая и математическая постановка задач. Разработана математическая модель температурного поля, позволяющая описать процесс тепло–массопереноса при электротепловой обработке скважины в зоне осложнения. Результаты теоретических исследований подтверждены скважинными исследованиями, вследствие чего установлена зависимость изменения температуры скважинной жидкости по оси скважины с течением времени. На основе выполненных исследований предложена принципиально новая, нетрадиционная технология изоляции зон поглощения, базирующаяся на заполнении каналов поглощения расплавом легкоплавких материалов.*

**Ключевые слова:** бурение скважин, поглощающий горизонт, термопластичные материалы, тепло–массоперенос.

### **Актуальность разработки**

Технико–экономические показатели бурения скважин в значительной мере определяются затратами времени и средств на устранение осложнений. Одним из наиболее распространенных осложнений является поглощение промывочной жидкости. Согласно статистическим данным на их ликвидацию расходуется до 20% средств и времени от общих расходов на сооружение скважины. Поглощение приводит к нарушению технологического режима бурения, провоцирует аварии.

В настоящее время существует большое многообразие технологий и материалов, применяемых для предупреждения и ликвидации поглощения промывочной жидкости. Предупредить поглощение промывочной жидкости возможно путем регулирования свойств промывочной жидкости, а также уменьшения перепада давления на поглощающий горизонт [1, 2]. Такие технологии имеют ограниченную область применения и в большинстве случаев малоэффективны.

Ликвидация поглощения обеспечивается тампонированием каналов отхода промывочной жидкости твердеющими или нетвердеющими тампонажными смесями путем создания водонепроницаемого экрана в породе вокруг скважины. Как правило, для ликвидации поглощения промывочной жидкости применяют недостаточно эффективные тампонажные материалы, которые приготавливают на водной основе с введением в их состав минераловязующих или синтетических веществ [3]. Основным недостатком этих материалов является то, что они обладают большой чувствительностью к разбавлению водой – растворы легко перемешиваются с промывочной жидкостью и пластовыми водами, особенно при наличии межпластового перетока. Происходит разубоживание, седиментация тампонажных растворов, ведущая к увеличению времени схватывания, растеканию на значительные расстояния от скважины и, как следствие, перерасходу тампонажных материалов и

повторению операций по тампонированию. Подтверждением тому могут служить данные, приведенные в работах Рафиенко И. И., Титкова И. И., Мехтиева Э. Х., Ивачева Л. М. [4]. В работах Ивачева Л. М. отмечается, что твердеющие тампонажные растворы имеют конечную прочность тампонажного камня, сопоставимую с прочностью горных пород проницаемой зоны, в силу чего эффект ликвидации поглощений может быть достигнут при радиусе заполнения каналов поглощения, измеряемом десятками сантиметров и даже сантиметрами.

Для решения этой проблемы необходим поиск новых технологических подходов, основанных на других физических процессах и новых тампонажных материалах, нечувствительных к разбавлению водой. К таким подходам могут быть отнесены методы создания изоляционных оболочек, которые основаны на изменении агрегатного состояния тампонажного материала и позволяющие создавать вокруг скважины малообъемную, но достаточно прочную и непроницаемую изоляционную оболочку. В этой связи актуальна задача разработки нетрадиционных технологии изоляции поглощающих горизонтов, основанных на заполнении каналов поглощения расплавом легкоплавких термопластичных материалов.

#### **Постановка задачи**

В Национальном горном университете(г.Днепр, Украина) на протяжении многих лет ведутся работы по разработке новых технологий тампонирования поглощающих горизонтов. Разрабатываемые технологии тампонирования поглощающих горизонтов, позволяют создавать малообъемные непроницаемые оболочки с применением тампонажных термопластичных, легкоплавких, легкопроницающих и быстро затвердевающих материалов [4].

Сущность новой технологии тампонирования заключается в создании изоляционной оболочки вокруг скважины или горной выработки, основана на изменении агрегатного состояния тампонажного расплава который, образует вокруг скважины малообъемную надежную непроницаемую изоляционную оболочку.

До настоящего времени в качестве термопластичных материалов применяли только нефтяные битумы. К основным недостаткам битумов как тампонажного материала относится его способность релаксировать во времени, т.е. при перепаде давления 0,3–0,5 МПа они способны течь даже при температуре +15<sup>0</sup>С. Расплавы битумов имеет плотность, близкую к плотности воды, и в среде промывочной жидкости способны расслаиваться и всплывать. Битумы плохо разбураивается и способен загрязнять буровой инструмент. Известны данные о их канцерогенном влиянии на окружающую среду. Из-за этих и других недостатков битумы не нашли широкого применения в качестве тампонажного материала.

Тампонажные материалы, применяемые для изоляции поглощающих горизонтов при твердении не должны давать усадки с образованием трещин, не растекаться в трещинах, должны обладать хорошей сцепляемостью с горными породами, быть устойчивыми к воздействию вод и перепадов давлений. Кроме того, эти материалы должны быть однокомпонентными, технологичными при доставке в зону тампониования, легко разбураиваться и смываться с бурового инструмента и обладать плотностью выше плотности очистного агента.

Проведенный анализ литературных источников по применению серы в качестве пропитывающего и вяжущего материала, и исследования физико-механических свойств подтвердили принципиальную возможность ее применения в качестве тампонажного материала для изоляции поглощающих горизонтов буровых скважин.

Твердая сера химически инертна, на нее разрушающе не действуют агрессивные воды. Сера легко разбураивается и не налипает на буровой инструмент. Срок хранения гранулированной серы не оказывает влияния на ее физико-механические свойства. Стоимость серы сопоставима со стоимостью цемента и намного меньше стоимости синтетических смол, битумов. Благодаря низкой вязкости расплава как чистой серы, так и серы с добавками пластификаторов она легко проникает в горные породы с незначительным раскрытием трещин. Хрупкость серы можно устранить введением в ее состав пластификаторов. Прочность тампонажного камня, полученного

при остывании расплава серы, сопоставима с прочностью цементного камня, причем в ранней стадии твердения прочность серы на порядок выше прочности на одноосное сжатие цементного камня. Температуру плавления тампонажного термопластичного материала можно регулировать введением пластификаторов.

Цель статьи – рассмотрение результатов теоретических исследований температурного поля в зоне действия забойного теплового источника и разработка общей концепции вычислительного эксперимента процессов тепло–массопереноса при ликвидации поглощения промывочной жидкости в буровой скважине с применением расплавов термопластичных материалов.

#### **Изложение основного материала**

Отличительной особенностью технологии является то, что термопластичный материал с низкой температурой плавления доставляется в зону осложнения в твердом виде, где расплавляется до жидкого состояния забойным тепловым источником. При этом промывочная жидкость, находящаяся в скважине в зоне поглощения, обязательно должна быть нагрета до температуры выше температуры плавления термопластичного материала.

Для реализации предлагаемой технологии необходимо выполнить следующие операции: нагрев промывочной жидкости в скважине; доставку, плавление и задавливание термопластичного материала в каналы поглощения [4]. Нагрев промывочной жидкости в скважине осуществляется забойным электронагревателем.

Для решения практических задач по определению: необходимого времени нагрева промывочной жидкости и термопластичного материала; температурного поля, при изоляции поглощающего горизонта, во времени и пространстве в зависимости от мощности теплового источника, теплофизических свойств тампонажного материала и окружающего пространства; радиуса образовавшейся вокруг скважины изоляционной оболочки и др., необходимо изучение процессов теплообмена в зоне поглощающего горизонта [5].

Аналитическое исследование этих процессов в настоящее время возможно осуществить методами численного моделирования с использованием компьютерных технологий. Такой подход приобретает значительную роль в связи с тем, что экспериментальное их изучение в лабораторных или натуральных условиях очень сложно и дорого, а в некоторых случаях становится просто невозможным [6, 7].

В соответствии с предлагаемой технологией изоляции поглощающих горизонтов термопластичными материалами в качестве теплоносителя используется скважинная жидкость, нагретая забойным электронагревателем [8]. Температура нагрева этого теплоносителя должна быть выше температуры плавления термопластичного материала. В этом случае при заданной мощности электронагревателя задача сводится к определению необходимого времени его работы и изменения температурного поля в зоне осложнения скважины.

Перенос тепла от неподвижного источника, расположенного в скважине, осуществляется теплопереносом и конвекцией [9]. Учитывается, что от цилиндрического нагревателя постоянной мощности, наряду с радиальным распространением тепла, имеется также отвод тепла в кровлю и подошву поглощающего пласта. Пласт рассматривается как однородная изотропная среда и тепловые константы пласта покрывающих и подстилающих пород считаются одинаковыми.

В результате нагрева теплоносителя, в нашем случае воды, и большой площади контакта происходит интенсивный теплообмен между водой и пластом. Принимаем, что радиус источника равен радиусу скважины, ось источника совпадает с осью скважины. Выберем следующую систему координат: начало координат совпадает с центром источника, ось  $z$  – с осью скважины, ось  $r$  проходит через середину источника (рис. 1).

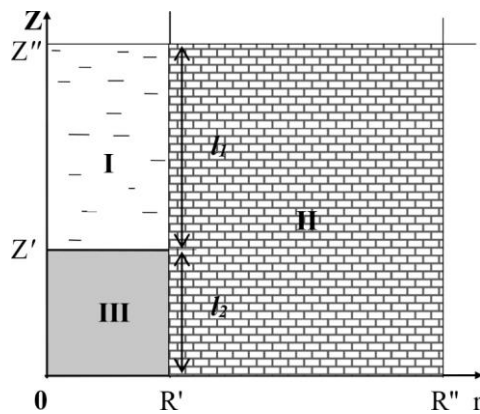


Рис. 1. Схема к математической постановке задачи: I – зона нагреваемого теплоносителя; II – зона окружающих пород; III – нагреватель

Распределение температуры  $T(r, z, \tau)$  найдем с помощью уравнения теплопроводности для симметричного источника в цилиндрических координатах.

$$\nu_z \frac{\partial T_1}{\partial z} + \frac{\partial T_1}{\partial \tau}(r, z, \tau) = a_m \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (\text{I зона}) \quad (1)$$

$$0 < r < R'; \quad Z' < Z < Z''; \quad \tau > 0;$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau}(r, z, \tau) = a_m \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (\text{II зона}) \quad (2)$$

$$0 < Z < Z''; \quad R'' < r < R';$$

при начальном условии:

$$T_1(r, z, 0) = T_2(r, z, 0) = T_0$$

и граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=0} = 0;$$

$$T_1|_{l_1} = T_2|_{l_1};$$

$$\lambda_B \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{l_1} = \lambda_m \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{l_1};$$

$$\left. \frac{\partial T_2}{\partial r} \right|_{r=R''} = 0 \quad \text{или} \quad T_2 \Big|_{r=R} = T_0;$$

$$\left. \frac{\partial T_2}{\partial z} \right|_{z=z''} = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{l_2} = -N_y;$$

$$\left. \frac{\partial T_2}{\partial z} \right|_{z=0} = 0;$$

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial z} \right|_{z=z'} = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=z'} = -N_y;$$

$$\lambda \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=z''} = 0;$$

где  $T_1, T_2$  – распределение температуры соответственно в зоне I и II;  $a_m$  – коэффициент температуропроводности;  $c_1$  – удельная теплоемкость скважинной жидкости;  $N_y$  – удельная мощность источника;  $T_0$  – начальное распределение температуры в горных породах и скважинной жидкости (в окружающей среде);  $R'$  – длина исследуемой области в направлении оси  $r$ ;  $Z'$  – длина исследуемой области в направлении оси  $z$ .

Определение скорости конвективного течения  $v_z$  представляет собой отдельную достаточно сложную задачу. В первом приближении примем ее постоянной. Для расчета используем соотношение [9]

$$v_z = \sqrt{2g\beta\vartheta}$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\beta$  – коэффициент термического расширения жидкости,  $\vartheta$  – разница между начальной температурой жидкости и температурой нагревателя.

Нелинейные задачи, как правило, не удается решить аналитическим методом. Для решения данной задачи можно применить численные методы. Из всех численных методов наиболее широкое распространение для решения задач теплопроводности получил метод конечных разностей (метод сеток) [10, 11]. Это объясняется универсальностью этого метода и его высокой алгоритмичностью, что открывает широкие возможности для использования вычислительной техники. Метод сеток дает возможность в математической формулировке задачи максимально отразить специфику протекания реального процесса и практически не налагает ограничений на условия задачи [12].

С этой целью разработан и реализован алгоритм численного моделирования процесса нагрева скважинной жидкости при изоляции поглощающего горизонта термопластичными материалами.

Разработанная программа позволяет при заданной мощности электронагревателя, теплофизических свойствах скважинной жидкости и горной породы поглощающего пласта определить характер распределения температуры во времени и пространстве (рис. 2).

Анализ результатов аналитических исследований позволил теоретически обосновать возможность нагрева призабойной зоны скважины до температуры  $+100\dots+150\text{ }^\circ\text{C}$  электронагревателями мощностью  $6\dots 10\text{ кВт}$  и разработать режим изоляции поглощающего горизонта с применением термопластичного материала.

Результаты аналитических исследований нашли подтверждение в ходе проведения скважинных исследований, в

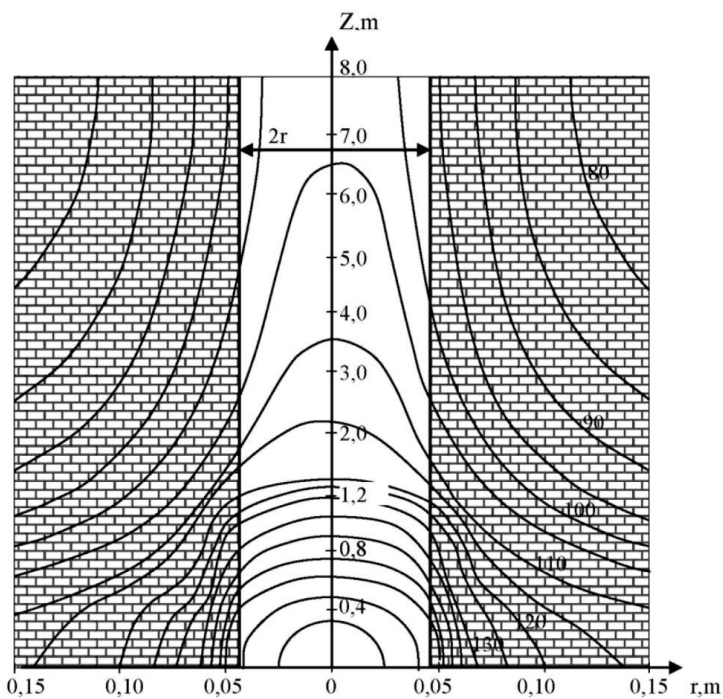


Рис. 2. Распределение температурного поля в скважине диаметром 93 мм по истечении 8 ч работы электронагревателя мощностью 10 кВт

результате которых установлена зависимость изменения температуры скважинной жидкости по оси скважины с течением времени (рис. 3).

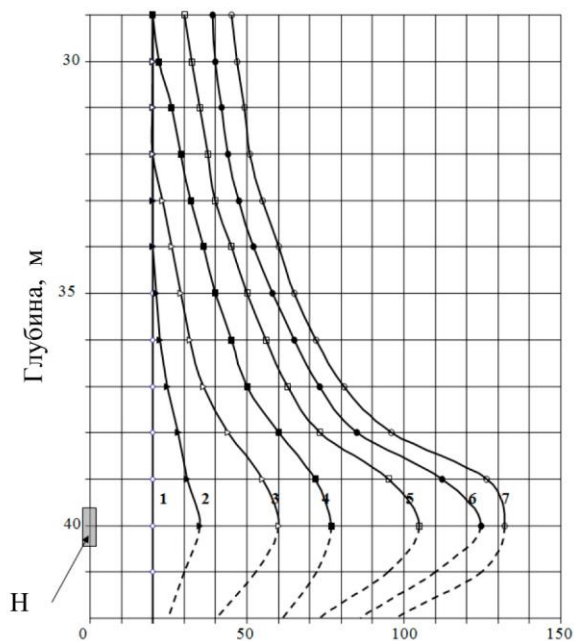


Рис. 3. Распределение температуры по высоте столба жидкости: 1 – 0 мин; 2 – 30 мин; 3 – 60 мин; 4 – 90 мин; 5 – 120 мин; 6 – 150 мин; 7 – 180 мин; Н – электронагреватель

моделирования параметров температурного поля, позволяет в каждом конкретном случае для различных типов сред и в зависимости от их теплофизических свойств, выбрать оптимальные режимы процесса нагрева теплоносителя, обеспечивающие минимальные потери тепловой энергии.

Результаты теоретических исследований нашли подтверждение в ходе промышленных исследований и стали базой для создания технологии изоляции зон поглощения, успешно апробированной в скважинных условиях.

*Досліджено температурне поле в зоні дії вибійного теплового джерела. Розроблено загальну концепцію обчислювального експерименту процесів тепло-масопереносу при ліквідації поглинання промивальної рідини в буровій свердловині із застосуванням розплавів термопластичних матеріалів.*

*Здійснено фізичну і математичну постановку завдань. Розроблено математичну модель температурного поля, що дозволяє описати процес тепло-масопереносу при електротепловій обробці свердловини в зоні ускладнення. Результати теоретичних досліджень підтверджено свердловинними дослідженнями, в наслідку яких встановлено залежність зміни температури свердловинної рідини по осі свердловини з часом. На основі виконаних досліджень запропоновано принципово нову, нетрадиційну технологію ізоляції зон поглинання, яка базується на заповненні каналів поглинання розплавом легкоплавких матеріалів.*

**Ключові слова:** буріння свердловин, поглинаючий горизонт, термопластичні матеріали, тепло-масоперенос.

#### THEORETICAL BASES OF TECHNOLOGY OF ISOLATION OF ABSORPTIVE HORIZONS BY THERMOPLASTIC MATERIALS

*The aim of the paper is to develop a general concept of computational experiment for processes of heat-and-mass-transfer while eliminating the swallowing of washing liquid in a borehole using thermoplastic materials melts.*

Достоверность результатов численного моделирования подтверждается значительным объемом выполненных скважинных исследований, обеспечивающих надежность полученных результатов при расхождении с теоретическими исследованиями в пределах 10–15%.

#### Выводы

На основании выполненных исследований предложена нетрадиционная технология изоляции зон поглощения, которая базируется на заполнении каналов поглощения расплавом легкоплавких материалов.

Составленная математическая модель температурного поля позволяет описать процесс теплопередачи при электротепловой обработке скважины в зоне осложнения. В результате различия теплофизических свойств на границе раздела двух сред (скважинная жидкость – порода) происходит значительный перепад температуры (рис. 2). Разработанная программа для компьютерного

*Problems are set from the point of view of physics and mathematics. General concept of computational experiment is considered under theoretical modelling of processes of heat-and-mass-transfer in elimination of washing liquid swallowing in a borehole. Theoretical foundations of swallowing horizons isolation using melts are developed, with algorithm to make a software system allowing to calculate the heat-and-mass-transfer processes in a wide range of conditions.*

**Keywords:** *drilling of hole, swallowing horizon, thermoplastic materials, heat-and-mass-transfer.*

### **Литература**

1. 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.
2. Удосконалення технології запобігання обвалювань 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.
3. Isolation technology for swallowing zones by thermoplastic materials on the basis of polyethyleneterephthalate / J. Kuzin, M. Isakova, D. Sudakova, O. Mostinets. // Scientific bulletin of National Mining University. – 2017. – N 1. – P. 34–39.
4. 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.
5. Concept of numerical experiment of isolation of absorptive horizons by thermoplastic materials / А. К. Sudakov, О. Ye. Khomenko, М. L. Isakova, D. A. Sudakova // Scientific bulletin of National Mining University. – 2016. – N 5(155). – P. 12–16.
6. Исследование теплопереноса в криогенно–гравийном фильтре при его транспортировке по стволу скважины / А. А. Кожевников, А. К. Судаков, А. Ю. Дреус, Е. Е. Лисенко // Науковий вісник НГУ. – 2013. – Вип. 6. – С. 49–54.
7. Substantiation of mining parameters of Mongolia uranium deposits / В. Zhanchiv, D. V. Rudakov, О. Ye. Khomenko, L. Tsendzhav // Scientific bulletin of National Mining University. – 2013. – N 4. – P. 10–18.
8. Судаков А.К. Технология изоляции зон поглощения буровых скважин с применением термопластичных материалов: автореф. дис. насоиск. науч. степ. канд. техн. наук: спец 05.15.10 «Бурение скважин» – Днепропетровск, 2000. – 18 с.
9. Bengt Sunden. Introduction to heat transfer. – Boston: WTI Press, Southampton, 2012. – 344 p.
10. Dreus A. Investigation of heating of the drilling bits and definition of the energy efficient drilling modes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technologies. – 2016. – 3. – N 7(81). – P. 41–46.
11. Шевченко А. И., Миненко А. С. Задача Стефана при наличии конвекции // Доповіді Національної академії наук України. – 2012. – № 1.
12. Дреус А. Ю. Математичні методи дослідження теплообміну – Д.: Вид-во ДНУ, 2013 – 130 с.

*Поступила 08.06.17*