

А. Ю. Дреус, А. А. Кожевников, Е. Е. Лысенко, А. К. Судаков

Математическое моделирование тепловых процессов в гравийных фильтрах гидрогеологических скважин

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины К. Ф. Тяпкиным)

Наведено математичну модель теплофізичних процесів у гравійних фільтрах з урахуванням інверсних фазових переходів в'язучої речовини. Виконано числові дослідження температурних полів у фільтрах, а також теплових процесів у гравійних фільтрах методами математичного моделювання, які проведено вперше.

Актуальность и состояние проблемы. Гравийные фильтры являются важным элементом водоприемной части буровых скважин и предназначены для очистки откачиваемых жидкостей от твердых примесей. По принципу изготовления гравийные фильтры подразделяются на *опускные*, которые собираются на поверхности с дальнейшей транспортировкой в готовом виде по стволу скважины, и *фильтры, изготавливаемые непосредственно в скважине* путем доставки гравия в кольцевое пространство. Учитывая современную тенденцию к постоянному увеличению глубины скважин, использование технологий изготовления гравийных фильтров в скважине становится все сложнее. Поэтому ведущие зарубежные и отечественные компании все больше внимания уделяют именно технологиям, в которых фильтры собираются на поверхности. Однако использование опускных фильтров сопряжено с рядом трудностей, среди которых проблема обеспечения достаточной прочности конструкции при транспортировке на забой. Эта проблема обуславливает необходимость использования таких вязущих веществ, как смолы, клеи и другие материалы, что снижает фильтрационную способность фильтра и ухудшает его экономические характеристики.

В Национальном горном университете предложена новая технология [1] изготовления гравийных фильтров, позволяющая во многом решить указанную проблему, основанную на использовании фазовых переходов связывающего вещества. Основная идея предложенного подхода заключается в промерзании вязущего вещества фильтра во время его изготовления и обратного фазового перехода вязущего вещества при его установке в забой скважины. Отметим, что вопрос устойчивости и прочности конструкции фильтра в такой технологии напрямую связан с интенсивностью внутреннего и внешнего теплообмена. Неудачный подбор минераловязущего материала, неправильный выбор глубины промерзания или учет внешних или временных условий в процессе сборки и транспортировки фильтра могут привести к преждевременному разупрочнению конструкции и даже ее разрушению вследствие растепления. Эффективным инструментом исследования динамики теплофизических процессов в фильтре во время его изготовления и при транспортировке по стволу скважины являются методы математического моделирования. Однако математическое моделирование физических процессов в гравийных фильтрах выполнялось только для изучения процессов фильтрации [2].

Цель данной работы — создание и адаптация математической модели тепловых процессов в гравийных фильтрах во время их промерзания и растепления, и проведение расчетов нестационарных тепловых полей.

Математическая модель. Для построения математической модели представим гравийный фильтр как ограниченный полый цилиндр, изготовленный из крупнодисперсного пористого материала (песок). В качестве вяжущего наполнителя рассматривается вода. Предположим, что теплообмен с окружающей средой как в случае промерзания, так и в случае растепления соответствует условиям свободной конвекции. Будем считать, что фазовый переход для рассматриваемой системы песок — вода почти полностью происходит при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, что подтверждается экспериментальными данными [3]. В общем случае эту задачу нужно решать совместно с влагопереносом, однако для длительных процессов при атмосферном давлении в первом приближении взаимным влиянием теплового поля и поля влажности можно пренебречь. С математической точки зрения такая проблема сводится к решению двухмерной краевой задачи с фазовым переходом вода — лед для крупнодисперсной среды. Уравнение теплопереноса запишем с использованием эффективной теплоемкости [4]:

$$c_{\text{эф}}(t)\rho(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial z}\right), \quad (1)$$

$$\tau > 0, \quad r_1 \leq r \leq r_2, \quad 0 \leq z \leq h,$$

где $c_{\text{эф}}$ — эффективная теплоемкость дисперсной среды; ρ — плотность дисперсной среды; λ — коэффициент теплопроводности дисперсной среды; τ — время; r_1, r_2 — внутренний и внешний радиусы фильтра; h — высота фильтра.

Во время растепления на поверхности образца будет появляться жидкая пленка, которая может стекать и таким образом содействовать конвективному переносу теплоты, и является дополнительным термическим сопротивлением. Предварительная оценка толщины образуемой пленки показывает, что ее влиянием на общую картину теплопереноса в первом приближении можно пренебречь. Тогда граничные условия для всех поверхностей с учетом конвективного теплообмена с окружающей средой и испарения на поверхности фильтра принимают вид

$$\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial n}\Big|_s = q + I \cdot G \quad (2)$$

(здесь I — теплота испарения; n — внешняя нормаль к границе; G — весовая скорость испарения). Конвективный тепловой поток равняется

$$q = \alpha|_s(t|_s - t_{\infty})$$

(здесь α — коэффициент конвективной теплоотдачи; $t|_s$ — температура поверхности фильтра; t_{∞} — температура окружающей среды). Весовая скорость испарения определяется

$$G = \beta \cdot (C|_s - C_{\infty})$$

(здесь β — коэффициент массоотдачи; $C|_s$ — концентрация водяного пара около поверхности испарения (насыщения); C_{∞} — концентрация водяного пара в окружающей среде). Значения концентраций определим с термодинамических соотношений

$$C|_s = \frac{P_s M}{RT}, \quad C_{\infty} = \frac{P_s \varphi M}{RT},$$

где P_s — давление насыщения; φ — относительная влажность воздуха; R — газовая постоянная, M — молярный вес; T — абсолютная температура воздуха.

Допустим, что начальное распределение температуры является однородным по объему конструкции:

$$t|_{\tau=0} = t_0. \quad (3)$$

Теплоемкость дисперсной среды есть величина аддитивная. Для почв, что промерзают или протаивают, удобно использовать эффективную теплоемкость, которая определяется так:

$$c_{\text{эф}}(t) = (1 - m)c_b + mi(t)c_i + m(1 - i(t))c_w + mL \frac{di(t)}{dt}, \quad (4)$$

где i — функция льдистости; m — пористость; c — теплоемкость; b, i, w — индексы относятся к скелету, льду и наполнителю (вода) соответственно.

Функция льдистости $i(t)$ представляет собой отношение массы льда к массе всей воды, которая содержится в дисперсной среде и изменяется в интервале от 0 (полностью талая зона) до 1 (полностью мерзлая зона). Эта функция зависит от многих факторов, которые достаточно сложно учесть, поэтому как правило определяется экспериментально и аппроксимируется разными линейными и нелинейными выражениями. В данной работе для определения $i(t)$ были использованы экспериментальные данные З. А. Нерсесовой, представленные в работе [3], и аппроксимированы с помощью нелинейного выражения предложенного в работе [5]:

$$i(t) = i_0 \left(\frac{1 - \exp[-\gamma(t - t_1)]}{1 - \exp[-\gamma(t_2 - t_1)]} \right)$$

(здесь i_0 — начальная льдистость; γ — коэффициент, характеризующий степень связанности воды в дисперсной среде; 1 и 2 индексы относятся к началу и концу фазового перехода). Коэффициент теплопроводности определяется как

$$\lambda(t) = \lambda_f + (\lambda_w - \lambda_f)(1 - i(t)),$$

где λ_f — коэффициент теплопроводности мерзлого песка; λ_w — коэффициент теплопроводности влажного песка.

Преимущество метода эффективной теплоемкости состоит в том, что возможно организовать вычислительную процедуру без явного выделения фронта фазового перехода и воспользоваться методом сквозного счета. Задача (1)–(4) была решена численным методом с использованием схемы сквозного счета, при этом расчет проводился на достаточно мелкой сетке, что позволило получить монотонные гладкие решения.

Результаты исследований. Результаты численного моделирования в виде полей температур представлены на рис. 1. Для этапа промерзания была принята начальная температура 25 °С, а температура в морозильной камере –21 °С. Как видим из рис. 1, наибольшие градиенты температур возникают на начальном этапе, во время охлаждения. Промерзание образца, т. е. возникновение ледяного слоя, начинается примерно после 5 ч пребывания в морозильной камере, а через 7 ч фронт фазового перехода уже значительно продвинулся в середину фильтра. Через сутки температура фильтра по всему объему почти одинаковая и принимает значение –14 °С. Процесс растепления происходит намного динамичнее,

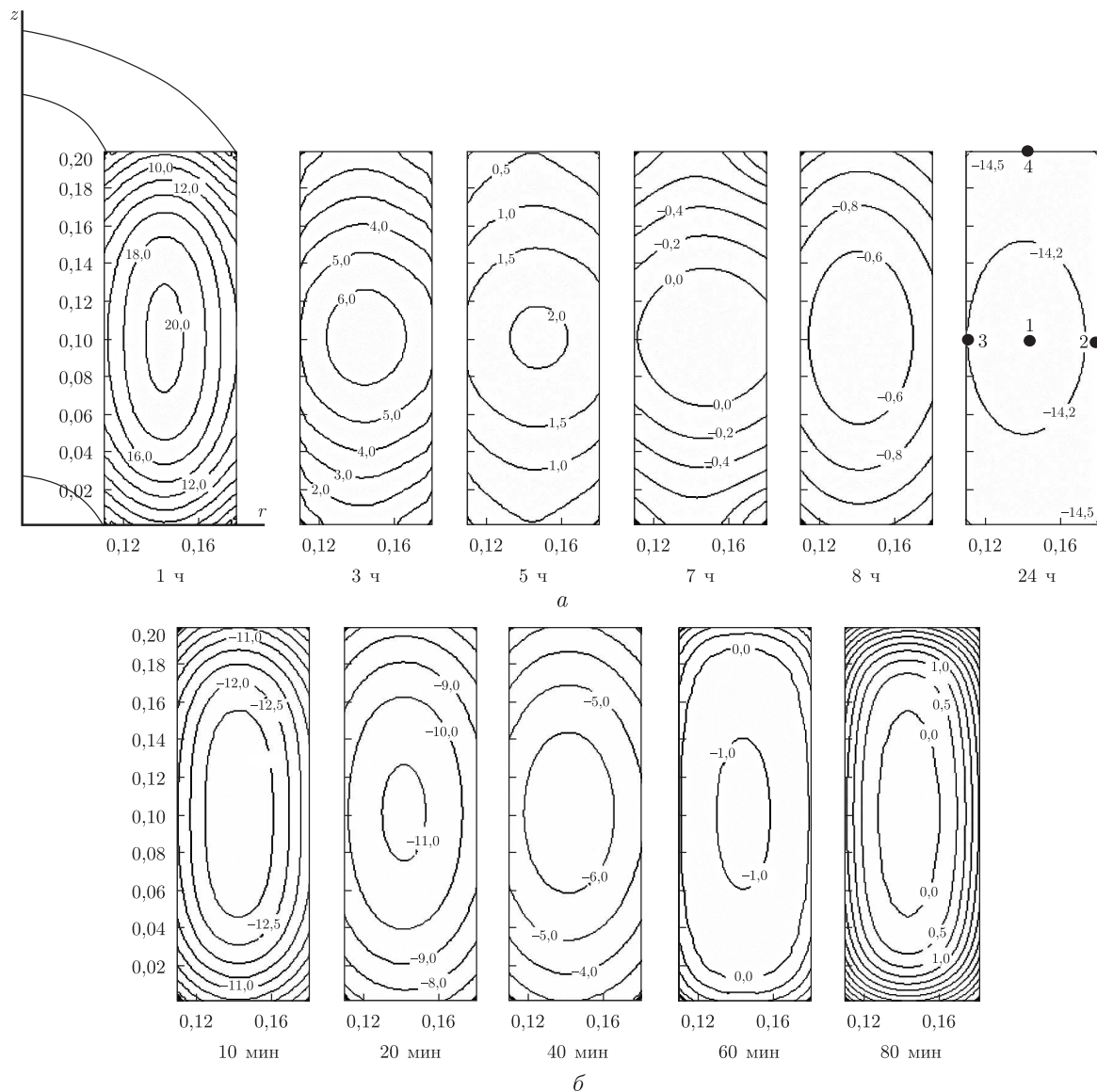


Рис. 1. Изотермы температуры в $^{\circ}\text{C}$ в цилиндрическом гравийном фильтре в процессе промерзания (а) и растепления (б) (точками обозначено расположение контрольных термопар)

чем промерзание за счет более интенсивного конвективного теплообмена с теплым воздухом. Начальная температура фильтра принималась -15°C , а температура окружающей среды 30°C . При этом условия моделирования отвечали спокойному состоянию среды, т. е. условиям свободной конвекции. Процесс фазового перехода начинается на поверхности приблизительно через 50 мин, что можно считать гранично допустимым временем пребывания конструкции в рассмотренных условиях.

На рис. 2 представлена динамика изменения температурного поля во время процессов промерзания (а) и растепления (б) для четырех точек, расположение которых показано на рис. 1, б. Отметим, что, согласно полученным данным, температура достигает значения температуры фазового перехода быстрее на торцевой поверхности цилиндрического образца.

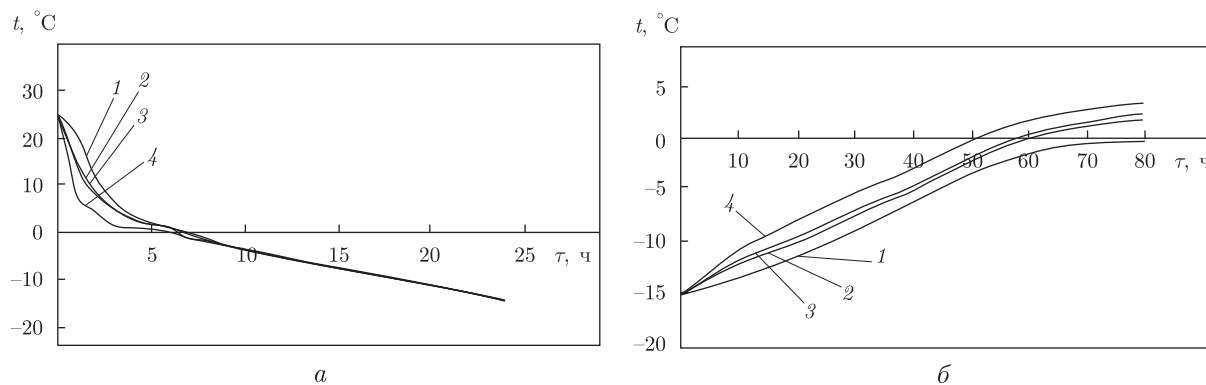


Рис. 2. Динамика изменения температуры в процессе промерзания *а*) и растепления (*б*) в контрольных точках

С некоторого времени во время промерзания температура фильтра выравнивается по всему объему, асимптотически стремясь к температуре окружающей среды.

Таким образом, нами впервые исследованы на основе математического моделирования процессы теплопереноса в гравийных фильтрах, которые изготавливаются по новой низкотемпературной технологии, и представлены результаты численного исследования теплофизических процессов, которые имеют место в таких фильтрах. Результаты моделирования представляют интерес с точки зрения определения рациональных технологических характеристик при изготовлении криогенных гравийных фильтров буровых скважин.

1. Кожеевников А. А., Гошовский С. В., Судаков А. К. Технология оборудования криогенно-гравийными фильтрами водоприемной части буровой скважины // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент. – 2009. – Вып. 12. – С. 62–66.
2. Толтаев В. А., Захаров В. В., Петухов А. А. Исследование фильтрации в призабойной зоне и в стволе нефтедобывающей скважины с гравийным фильтром // Нефтепромысловое дело. – 2004. – № 8. – С. 33–38.
3. Савельев Б. А. Физико-химическая механика мерзлых пород. – Москва: Недра, 1989. – 211 с.
4. Лыков А. В. Теория сушки. – Москва: Энергия, 1968. – 472 с.
5. Пермьяков П. П. Идентификация параметров математической модели теплового переноса в мерзлых грунтах. – Новосибирск: Наука, 1989. – 86 с.

ГВУЗ “Национальный горный университет”,
Днепропетровск
Днепропетровский национальный университет
им. О. Гончара

Поступило в редакцию 28.12.2010

A. J. Dreus, A. A. Kogevnikov, K. Ye. Lysenko, A. K. Sudakov

Mathematical modeling of heat processes in gravel filters of hydrogeological boreholes

A mathematical model of thermal physical processes in gravel filters is presented with regard for the inverse phase exchange of a binding medium. The numerical study of temperature fields in a gravel filter is carried out for the first time.