

УДК 622.233: 551.49

А.А. Кожевников¹, д-р техн. наук, проф.,
 А.К. Судаков¹, канд. техн. наук, доц.,
 А.Ю. Дреус², канд. техн. наук, доц.,
 Е.Е. Лысенко²

1 – Государственное высшее учебное заведение „Националь-
 ный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина,
 e-mail: sudakov@ukr.net

2 – Днепропетровский национальный университет им. О. Гон-
 чара, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: dreus@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В КРИОГЕННО–ГРАВИЙНОМ ФИЛЬТРЕ ПРИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПО СТВОЛУ СКВАЖИНЫ

А.А. Kozhevnikov¹, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
 А.К. Sudakov¹, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,
 А.Yu. Dreus², Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,
 Ye.Ye. Lysenko²

1 – State Higher Educational Institution “National Mining Uni-
 versity”, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: sudakov@ukr.net

2 – O. Gonchar Dnepropetrovsk National University, Dnepro-
 petrovsk, Ukraine, e-mail: dreus@rambler.ru

STUDY OF HEAT TRANSFER IN CRYOGENIC GRAVEL FILTER DURING ITS TRANSPORTATION ALONG A DRILLHOLE

Цель. Исследование процесса теплопереноса в пористой крупнодисперсной среде криогенно-гравийного элемента фильтра блочной конструкции, изготовленного по низкотемпературной технологии, при его транспортировке по стволу скважины.

Методика. Математическое моделирование процесса теплопереноса. Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных исследований процесса растепления криогенно-гравийного элемента в водной среде, полученных в стендовых условиях.

Результаты. Разработана математическая модель процесса теплопереноса в пористой крупнодисперсной среде криогенно-гравийного элемента фильтра при транспортировании его по стволу скважины. В зависимости от условий теплообмена (физико-механических свойств композита криогенно-гравийного элемента фильтра, температуры его нагрева, температуры окружающей среды и т. д.) обоснованы технологические режимы процесса транспортирования криогенно-гравийного фильтра по стволу скважины.

Научная новизна. Впервые получена зависимость времени фазового перехода композита экспериментального образца криогенно-гравийного элемента от его теплофизических характеристик в процессе теплопереноса в пористой крупнодисперсной среде при транспортировании фильтра по стволу скважины.

Практическая значимость. Результаты численных исследований использованы при обосновании и разработке методики проектирования технологий изготовления криогенно-гравийных элементов и оборудования продуктивных горизонтов буровых скважин.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплоперенос, криогенная технология, криогенно-гравийный фильтр

Введение. Согласно разрабатываемой технологии [1], для оборудования криогенно-гравийным фильтром (КГФ) буровой скважины необходимо выполнить технологические операции, относящиеся к подготовительному и основному периодам. В подготовительный период осуществляют извлечение готовых криогенно-гравийных элементов (КГЭ) фильтра из форм, сборку на дневной поверхности КГФ и подготовку его к спуску в скважину. В основной период – выполняют спуск по стволу скважины, наращивание и посадку КГФ в водоприемную часть скважины.

Исходя из опыта оборудования гидрогеологических скважин фильтровыми колоннами и гравийными фильтрами, время, которое затрачивается на выполнение этих операций, может быть существенным. Во многом оно зависит от глубины и диаметра скважины.

Для оценки „жизнеспособности“ омоноличенного КГЭ фильтра при выполнении технологических операций основного периода необходимо знать время его фазового перехода. Для этого были исследованы процессы теплопереноса в пористой крупнодисперсной среде КГЭ фильтра в водной среде при транспортировке КГФ по стволу и посадке его в водоприемную часть буровой скважины. Данные исследования были выполнены как в лабораторных условиях, так и путем математического моделирования.

Цель работы. Математическое моделирование теплопереноса в процессе растепления КГЭ фильтра при транспортировке по стволу буровой скважины.

Согласно разрабатываемой технологии, транспортировка КГФ осуществляется на колонне бурильных труб по стволу буровой скважины, которая состоит из циклов. Каждый цикл ограничен временем присоединения последующей свечи труб. Внутри каждого цикла условно время транспортировки свечи можно разделить на чистое время транспортировки единичной свечи по стволу скважины и время наращивания

колонны труб. КГФ находится на каркасе фильтровой колонны 3 (рис. 1, а), и в зависимости от его длины может быть по торцам ограничен металлическими опорами 9, разбивающими КГФ на криогенно-гравийные секции фильтра. При этом, статический уровень жидкости в скважине может быть незначительным, что сократит время транспортировки КГФ

по стволу скважины и, как следствие, время приведения его в рабочее состояние. Поэтому расчет проводился для самых неблагоприятных условий, т. е. принимаем, что транспортировка КГФ по стволу скважины происходит в водной среде. И в дальнейших расчетах используем теплофизические характеристики воды.

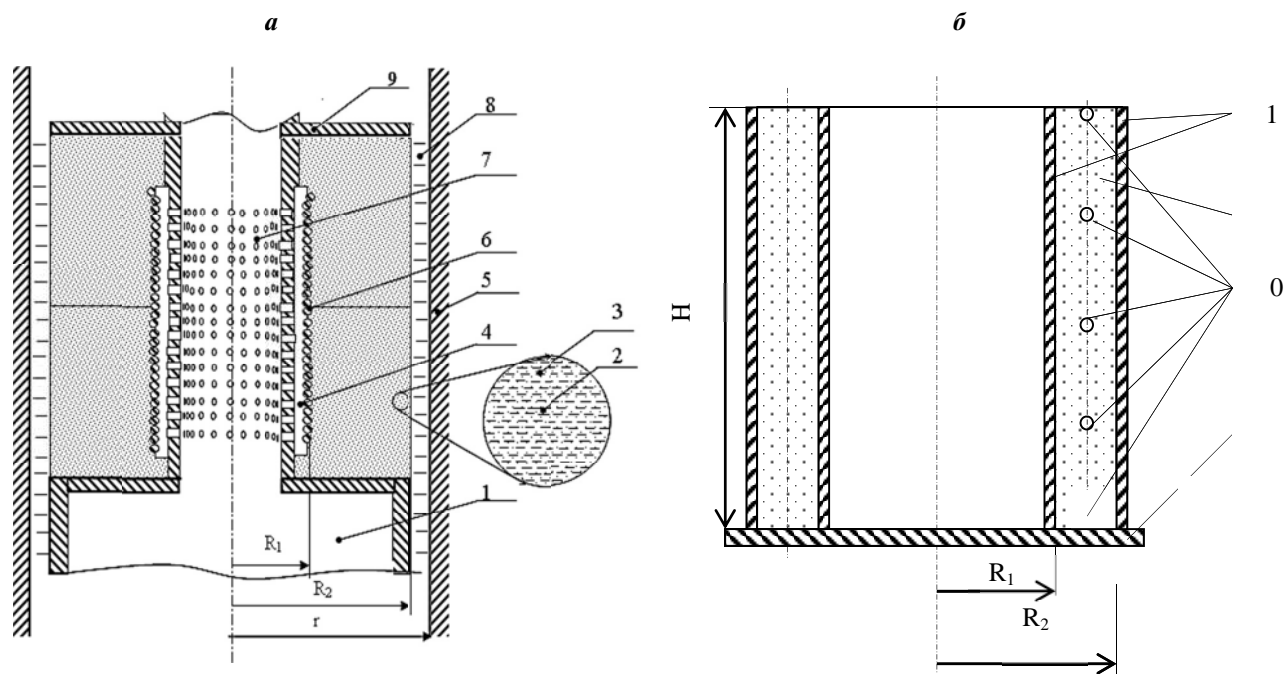


Рис. 1. Схема криогенно-гравийного фильтра: а – во время спуска криогенно-гравийного фильтра по стволу буровой скважины; б – расчетная модель криогенно-гравийного элемента фильтра; 1 – отстойник; 2 – материал гравийной обсытки; 3 – минераловязущий материал; 4 – подкладные прутки; 5 – стенки скважины; 6 – проволочная обмотка; 7 – трубчатый каркас фильтра; 8 – скважинная жидкость; 9 – металлические опоры; 10 – корпус формы; 11 – контрольные точки

С физической точки зрения КГЭ представляет собой многофазную и многокомпонентную систему, которая состоит из гравия – минеральная составляющая, и воды – дисперсионная среда. Дисперсионная среда, исходя из технологии оборудования буровых скважин КГФ, в подготовительный период находится в твердом состоянии, а при повышении температуры композита КГЭ выше температуры фазового перехода – в жидком. Таким образом, дисперсионная среда претерпевает фазовый переход, и сформулированная задача сводится к решению задачи Стефана.

В общем случае данную задачу необходимо рассматривать совместно с влагопереносом, однако, в силу принятых допущений, влиянием влажности на температурное поле пренебрегаем.

На рис. 1, б показана расчетная модель образца КГЭ фильтра.

Для определения предельно допустимого времени нахождения КГФ в водной среде используем дифференциальное уравнение теплопереноса с использованием метода эффективной теплоемкости [2]

$$c_{ef}(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right); \quad (1)$$

$$\tau > 0, R_1 < r < R_2, 0 < z < H.$$

Тогда начальные и граничные условия

$$T|_{\tau=0} = T_0;$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial s}\Big|_n = \bar{\alpha}(T|_s - T_\infty), \quad (2)$$

где T_∞ – температура окружающей среды; $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент теплоотдачи.

Теплофизические параметры исследуемой среды, которые входят в (1), зависят от температуры, влажности, пористости и дисперсности горной породы. Необходимо также учитывать тот факт, что в дисперсионной среде фазовый переход влаги, находящейся в поровом пространстве КГЭ, происходит в диапазоне отрицательных температур.

А.Г. Колесников функцию льдистости $i(T)$, учитывая наличие зоны фазового перехода, аппроксимировал выражением вида

$$i(T) = i_k \frac{1 - e^{-m(T-T_H)}}{1 - e^{-m(T_K-T_H)}}, \quad (3)$$

где i_k – значение льдистости при температуре \dot{O}_E , которое зависит от количества прочносвязанной влаги; \dot{O}_I, \dot{O}_E – температура начала и конца фазового перехода соответственно; α – коэффициент, который характеризует степень связанности воды с горной породой; δ – коэффициент, который зависит от дисперсности и структурного состава пористого материала.

Эмпирическим путем установлено, что чем сильнее связана вода в порах, тем меньше α , а при замерзании свободной воды $\delta \rightarrow \infty$.

Эффективная теплоемкость является аддитивной величиной и для ее определения используем

$$c_{ef}(T) = (1 - \Pi) \cdot c_{sk} + \Pi \cdot i(T) \cdot U_0 \cdot c_i + \Pi \cdot (1 - i(T)) \cdot U_0 \cdot c_l + \frac{\rho_l}{\rho} \cdot \Pi \cdot l \frac{di}{dT}, \quad (4)$$

где Π – пористость; c_{sk}, c_l, c_i – теплоемкости горной породы, льда и воды соответственно; $\rho_l(T)$ – плотность льда.

Коэффициент теплопроводности дисперсионной среды КГФ определим как

$$\lambda = \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1)(1 - i(T)), \quad (5)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности мерзлой и талой фаз, которые П.П. Пермяковым определяются как

$$\lambda_1 = 1,7(\rho \cdot 10^{-3} + 0,1U_0 - 1,1) - 0,1U_0;$$

$$\lambda_2 = 1,5(\rho \cdot 10^{-3} + 0,1U_0 - 1,1) - 0,1U_0.$$

Для определения коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ во время транспортировки КГФ на колонне труб используем выражение определения $\bar{\alpha}$ для вертикального полого цилиндра, который находится в условиях вынужденной конвекции. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{w\delta}{\nu},$$

где w – скорость спуска фильтра (1–3 м/с); ν – коэффициент кинематической вязкости воды; δ – толщина кольцевого зазора между стенками КГФ и скважины.

Тогда $Nu = 0,24 \cdot Re^{0,43} Pr^{0,33}$, а коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_2}{d_2}. \quad (6)$$

Во время этапа наращивания бурильной колонны, для определения коэффициента теплоотдачи, используем зависимости $\bar{\alpha}$ для вертикального цилиндра в режиме свободной конвекции в кольцевом пространстве толщиной δ .

Результаты решения задачи (1–2), полученные численным методом, выполнены для температуры скважинной жидкости $T_\infty = +5^\circ C$ в зависимости от начальной температуры КГЭ фильтра T_0 . Результаты моделирования приведены на рис. 2.

На рис. 2 показаны изотермы температуры в процессе транспортировки КГФ по стволу скважины. При этом учитывали, что экспериментальный образец КГЭ фильтра 0,5 часа растеплялся в воздушной среде. Это время было затрачено для сборки КГФ. Средняя температура КГЭ по прошествии 0,5 часа составила $T_0 = -10^\circ C$. Теплообменные процессы в композите КГЭ фильтра происходят в результате свободной конвекции с окружающей средой. При транспортировке КГФ по стволу скважины в водной среде с $T_\infty = +5^\circ C$ (рис. 2) процесс фазового перехода вяжущего в КГЭ начинается по истечении 20–25 мин и длится более 1,5 часов. При этом, в силу конструктивных особенностей КГФ и технологии его транспортировки по стволу скважины, наиболее интенсивные теплообменные процессы происходят на его наружной контактной поверхности, которые усиливаются гидродинамическим воздействием скважинной жидкости.

Фильтровая колонна имеет закрытый башмак. Поэтому внутренняя полость КГЭ контактирует только с фильтровой колонной, на которой транспортируется КГФ по стволу скважины. Скважинная жидкость с внутренней полостью КГЭ не контактирует. Поэтому теплообменные процессы на внутренней поверхности КГЭ фильтра происходят более медленно. Но в целом по прошествии 1,5 часов температура контактных поверхностей КГЭ становится равной температуре окружающей среды, а в его центральной части происходит фазовый переход вяжущего.

Анализируя результаты, полученные при решении (1–2) и представленные на рис. 2, можно сделать вывод о том, что КГЭ фильтра с наружным диаметром 180 мм, внутренним диаметром 110 мм и высотой 200 мм полностью растепляется по прошествии 1,5 часов при $T_\infty = +5^\circ C$. Следовательно, необходимо стремиться к тому, чтобы при данных физических условиях технология оборудования КГФ буровых скважин позволяла их доставлять в продуктивный горизонт за означенное время.

Результаты численных исследований сравнили с результатами экспериментальных исследований (рис. 3) процесса растепления КГЭ в водной среде.

На рис. 3 представлены результаты измерения температуры в экспериментальном образце для контрольной точки № 3 и результаты вычислительного эксперимента. Качественное соответствие экспериментальной и расчетной кривых очевидно.

При теплообменных процессах растепления в водной среде можно выделить три основных этапа: 1 этап – „интенсивный нагрев“ образца до температуры фазового перехода вязящего вещества; 2 этап – „раскристаллизация КГЭ“, период фазового перехода, на протяжении которого температура постоянна; 3 этап – „окончательный нагрев“ до температуры окружающей среды.

Расхождение между экспериментальными и расчетными данными в среднем составляет 5%. Максимальное отклонение между данными составило 20%. Из этого можно сделать вывод, что полученное расхождение является вполне удовлетворительным и свидетельствует о возможности применения математической модели для исследования процесса теплопереноса в КГЭ.

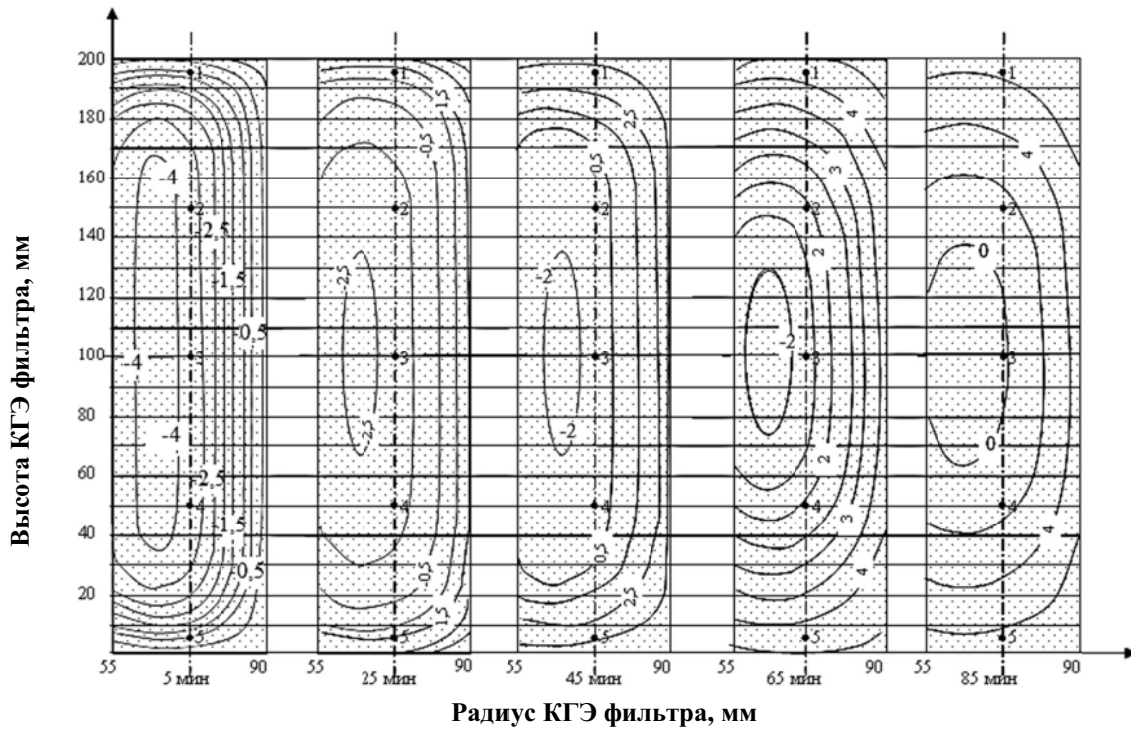


Рис. 2. Температурные поля в КГЭ фильтра в процессе его транспортировки по стволу скважины в водной среде при $T_{\infty} = +5^{\circ}\text{C}$: ● – контрольные точки

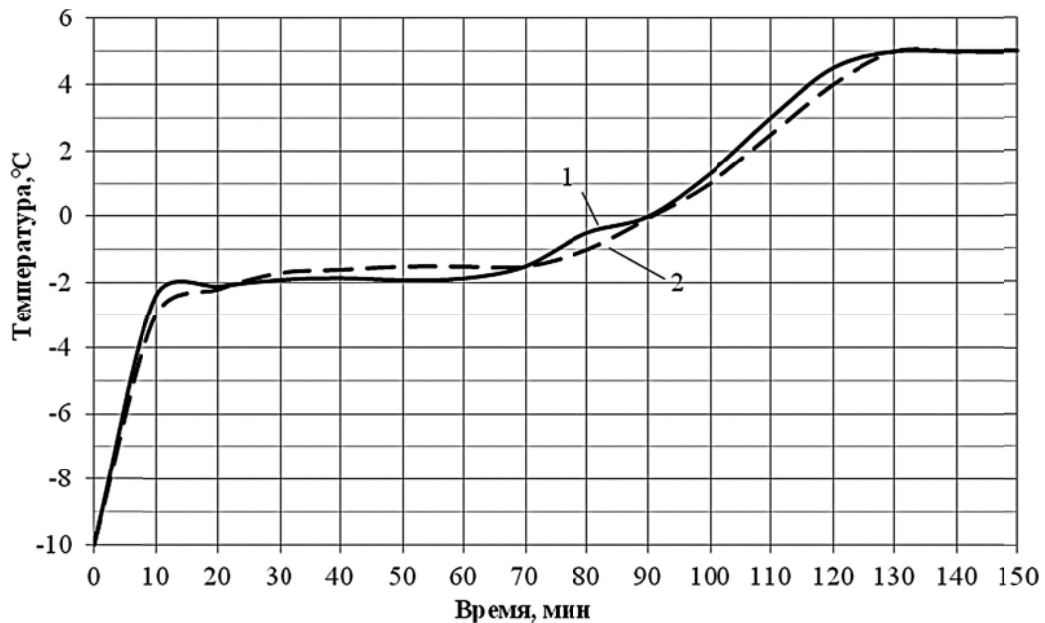


Рис. 3. Изменение температуры образца в контрольной точке № 3 в процессе его растепления в водной среде по данным: 1 – расчета; 2 – эксперимента

Представляет интерес определение времени растепления КГЭ фильтра в зависимости от температуры его нагрева и температуры скважинной жидкости. Как и в предыдущем случае, расчет продолжительности времени фазового перехода в зависимости от температуры нагрева контактной поверхности КГЭ фильтра в процессе его растепления при транспортировке по стволу скважины проводился для водной

среды с температурой $T_{\infty} = +5^{\circ}\text{C}$. Результаты исследования по вышеописанному алгоритму приведены на рис. 4.

При расчете начальная температура образцов КГЭ фильтра находилась в диапазоне от -180 до -20°C . Расчет проведен с шагом в 20°C . Конечная температура КГЭ принята $+5^{\circ}\text{C}$. Определение температуры осуществлялось для контрольной точки № 3.

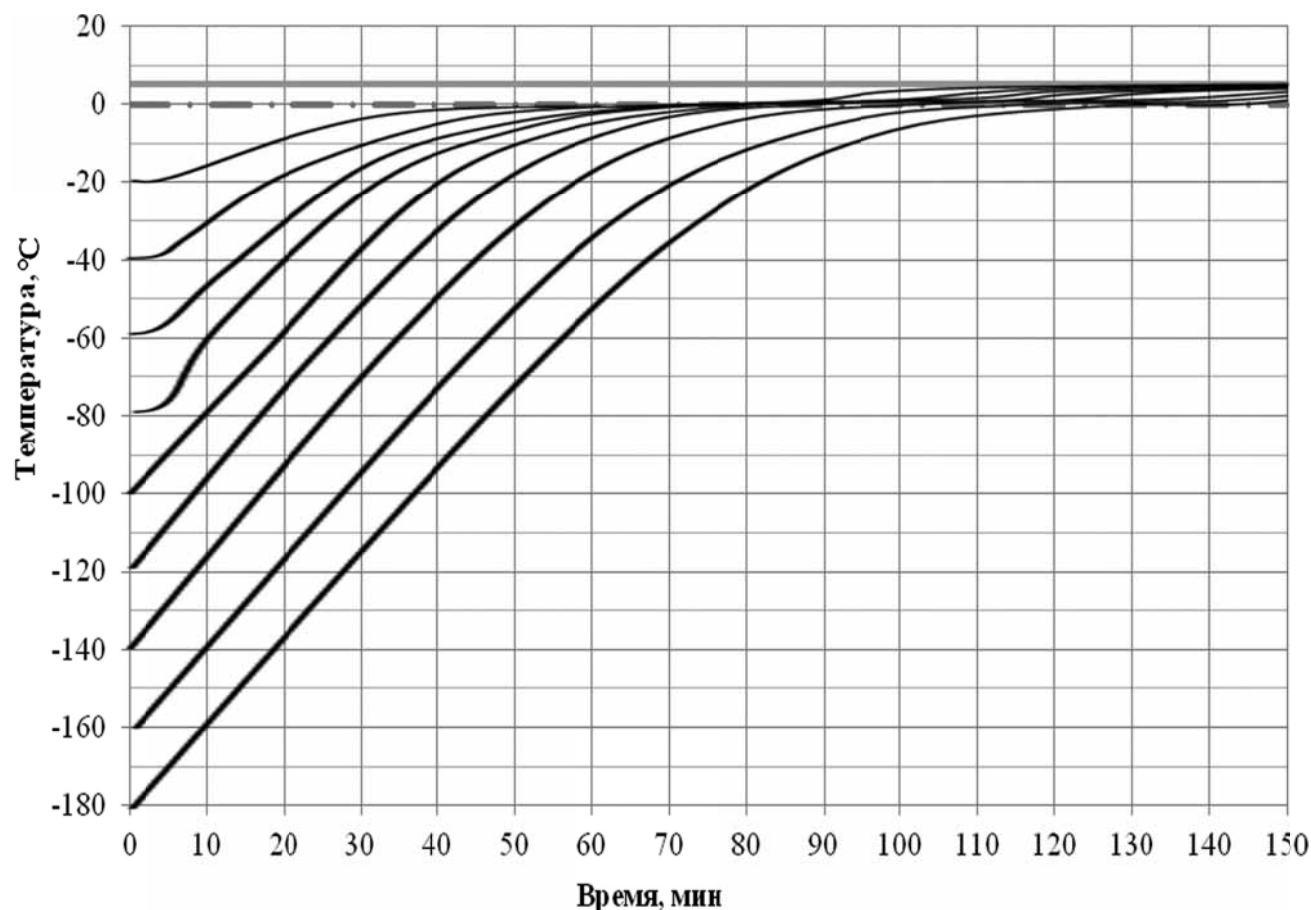


Рис. 4. Расчетное изменение продолжительности времени фазового перехода в зависимости от температуры нагрева контактной поверхности КГЭ фильтра в процессе растепления в водной среде при $T_{\infty} = +5^{\circ}\text{C}$

Анализируя результаты расчетов, приведенных на рис. 4, можно сказать, что, независимо от температуры нагрева КГЭ, характер растепления КГЭ фильтра неизменен и происходит в три этапа.

При начальной температуре (рис. 4) растепления КГЭ $T_0 = -20^{\circ}\text{C}$ и температуре скважинной жидкости $T_{\infty} = +5^{\circ}\text{C}$ время: интенсивного нагрева составило 50 мин; фазового перехода – 40 мин; окончательного нагрева до температуры окружающей среды – 30 мин. С понижением начальной температуры растепления КГЭ до $T_0 = -180^{\circ}\text{C}$ время растепления КГЭ фильтров существенно увеличивается и составляет соответственно: 1 этап – 120 мин; 2 этап – 25 мин; 3 этап – 20 мин. В виду того, что „жизнеспособность“ КГФ определяют первые два этапа, то их и надо учитывать при проектировании технологии оборудования КГФ продуктивных горизонтов буровых скважин.

Таким образом, время, за которое КГФ должен быть доставлен и посажен в водопримную часть скважины, при условии, что $T_{\infty} = +5^{\circ}\text{C}$, составит при $T_0 = -20^{\circ}\text{C}$ – 90 мин, при $T_0 = -180^{\circ}\text{C}$ – 150 мин. Т. е. при сохранении начальных условий транспортировки есть возможность увеличить время оборудования водопримной части буровой скважины КГФ в 2 раза, а, соответственно, и глубину оборудуемых продуктивных горизонтов. Это может быть достигнуто за счет понижения температуры заморозки КГЭ фильтра до $T_0 = -180^{\circ}\text{C}$.

Выводы. В результате исследования процесса теплопереноса в пористой крупнодисперсной среде криогенно-гравийного элемента фильтра в процессе его транспортировки по стволу буровой скважины установлено, что:

- разработанная математическая модель адекватна натурным условиям. Расхождение между экспери-

ментальними і расчётними даними не перевищило 5%, а максимальне відхилення склало 20%, що свідчить про можливість застосування розробленої математичної моделі для дослідження процесів теплопереносу в КГЭ фільтрів бурових скважин;

- розроблена математична модель дозволяє оцінити час виконання технологічних операцій по транспортуванню КГЭ фільтра по стволу бурової скважини в залежності від умов теплообміну.

Список литературы / References

1. Новая технология создания гравийных фильтров буровых скважин / А.А. Кожевников, А.К. Судаков, С.М. Сушко, А.Д. Бегун // Горный журнал Казахстана – 2011. – № 10. – С. 4–8.

Kozhevnikov, A.A., Sudakov, A.K., Sushko, S.M. and Begun, A.D. (2010), "New technology of creation of gravelers for drillholes", *Mining Journal of Kazakhstan*, no. 10. pp. 4–8.

2. Поврезнюк Е.Б. Математическая модель промерзания (оттаивания) малопроницаемой водонасыщенной пористой среды, содержащей воздух / Е.Б. Поврезнюк, А.А. Рядно // Вісник Дніпр. ун., серія Механіка – 1999. – вип. 2. – Т. 1. – С. 89–94.

Pobrezniuk, Ye.B. and Ryadno, A.A. (1999), "The mathematical model of freezing (thawing) in less-permeable, water-saturated, porous environment, which contains air", *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu, Mechanics series*, no.2, vol.1, pp. 89–94.

Мета. Дослідження процесу теплопереносу в пористому крупнодисперсному середовищі криогенно-гравійного елемента фільтру блокової конструкції, виготовленого за низькотемпературною технологією, при його транспортуванні по стовбуру свердловини.

Методика. Математичне моделювання процесу теплопереносу. Порівняльний аналіз результатів моделювання та експериментальних досліджень процесу растеплення криогенно-гравійного елемента у водному середовищі, отриманих у стендових умовах.

Результати. Розроблена математична модель процесу теплопереносу в пористому крупнодисперсному середовищі криогенно-гравійного елемента фільтру при транспортуванні його по стовбуру свердловини. Залежно від умов теплообміну (фізико-механічних властивостей композиту криогенно-гравійного елемента фільтру, температури його нагріву, температури навколишнього середовища та ін.) обґрунтовані технологічні режими процесу транспортування криогенно-гравійного фільтру по стовбуру свердловини.

Наукова новизна. Уперше отримана залежність часу фазового переходу композиту експериментального зразка криогенно-гравійного елемента від його теплофізичних характеристик у процесі теплопереносу в пористому крупнодисперсному середовищі при транспортуванні фільтру по стволу свердловини.

Практична значимість. Результати чисельних досліджень використані при обґрунтуванні й розробці методики проектування технологій виготовлення криогенно-гравійних елементів і обладнання продуктивних горизонтів бурових свердловин.

Ключові слова: математичне моделювання, теплопереніс, криогенна технологія, криогенно-гравійний фільтр

Purpose. To examine the process of heat transmission in the porous coarse environment of cryogenic gravel filters element of block construction, manufactured by low-temperature technology, during its transportation along the drillhole.

Methodology. We have applied the mathematical simulation of the heat transmission process. We have carried out the comparative analysis of the results of the simulation and test-bed experimental research of the process of heating the cryogenic gravel element in the aqueous environment.

Findings. We have created the mathematical model of the process of heat transmission in the porous coarse environment of cryogenic gravel filters element during its transportation along the drillhole. According to the conditions of heat transmission (physical-mechanical properties of the composite in cryogenic gravel filter element, temperature of cryogenic gravel element heating, and temperature of environment, etc.) we have substantiated the technological conditions of the cryogenic-gravel filter transportation along the drillhole.

Originality. For the first time we have obtained the dependence of phase transition time of composite on its thermal and physical characteristics during the heat transmission in porous coarse environment during its transportation along the drillhole. This composite was the experimental example of cryogenic gravel element.

Practical value. The results of numeral investigations contributed to development of the methods of designing the manufacturing technologies of the cryogenic-gravel elements and equipment for the productive horizons of boreholes.

Keywords: mathematical simulation, heat transmission, cryogenic technology, cryogenic-gravel filter

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.М. Давиденком. Дата надходження рукопису 20.03.13.