

**А.А. Кожевников<sup>1</sup>, А.К. Судаков<sup>1</sup>, А.Ю. Дреус<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепропетровск

<sup>2</sup> Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск

## **НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБОРУДОВАНИЯ БУРОВЫХ СКВАЖИН КРИОГЕННО-ГРАВИЙНЫМИ ФИЛЬТРАМИ**



Описаны технологии изготовления криогенно-гравийного элемента фильтра и оборудования водоприемной части буровой скважины криогенно-гравийным фильтром. Обоснованы рецептуры минерального вяжущего вещества и криогенно-гравийного композита. Установлены закономерности влияния: физических полей на изменение их свойств и технологических операций по оборудованию водоприемной части буровой скважины на изменение физико-механических, теплофизических и технологических свойств экспериментального криогенно-гравийного элемента фильтра. Теоретически и экспериментально отработаны параметры технологии доставки к водоприемной части буровой скважины криогенно-гравийного фильтра.

*Ключевые слова:* буровая скважина, криогенная технология, криогенно-гравийный фильтр, желатин.

В буровых скважинах на воду, нефть, газ и при подземном выщелачивании движение флюидов осуществляют: а) в прямом (из скважины), б) обратном (в скважину) и г) реверсивном (в скважины подземных хранилищ газа) направлениях. На весь период эксплуатации скважины стенки ее в пределах продуктивного пласта должны быть устойчивыми. Это достигается установкой в скважине фильтра, назначение которого состоит в предохранении стенок скважин от обрушения и в очистке флюидов, поступающих на дневную поверхность от твердых примесей.

В зависимости от крупности частиц горной породы продуктивного пласта конструкции фильтров могут быть самыми разными: от самых простых — *трубчатых с перфорацией* или *каркасно-стержневых* до самых сложных — *гравийных*. Гравийные фильтры применяют в скважинах,

когда продуктивный пласт состоит из песка, причем если песок среднезернистый, то рекомендуется фильтр с однослойной гравийной обсыпкой, если песок мелкозернистый, то фильтр рекомендуется многослойный (двух-, трехслойный).

Технологии изготовления гравийных фильтров можно разделить на два класса (рис. 1). При первом варианте гравийный фильтр создается на дневной поверхности и в готовом виде опускается в скважину. Во втором случае в скважину после спуска каркаса фильтровой колонны доставляется рыхлый гравийный материал. Обе конструкции и технологии имеют свои достоинства и недостатки. Существенными недостатками этих технологий являются их сложность и дороговизна выполнения технологических операций.

Эта проблема особенно актуальна при организации хозяйственно-питьевого водоснабжения как в Украине, так и во всем мире. Проблема питьевой воды в мире приобретает

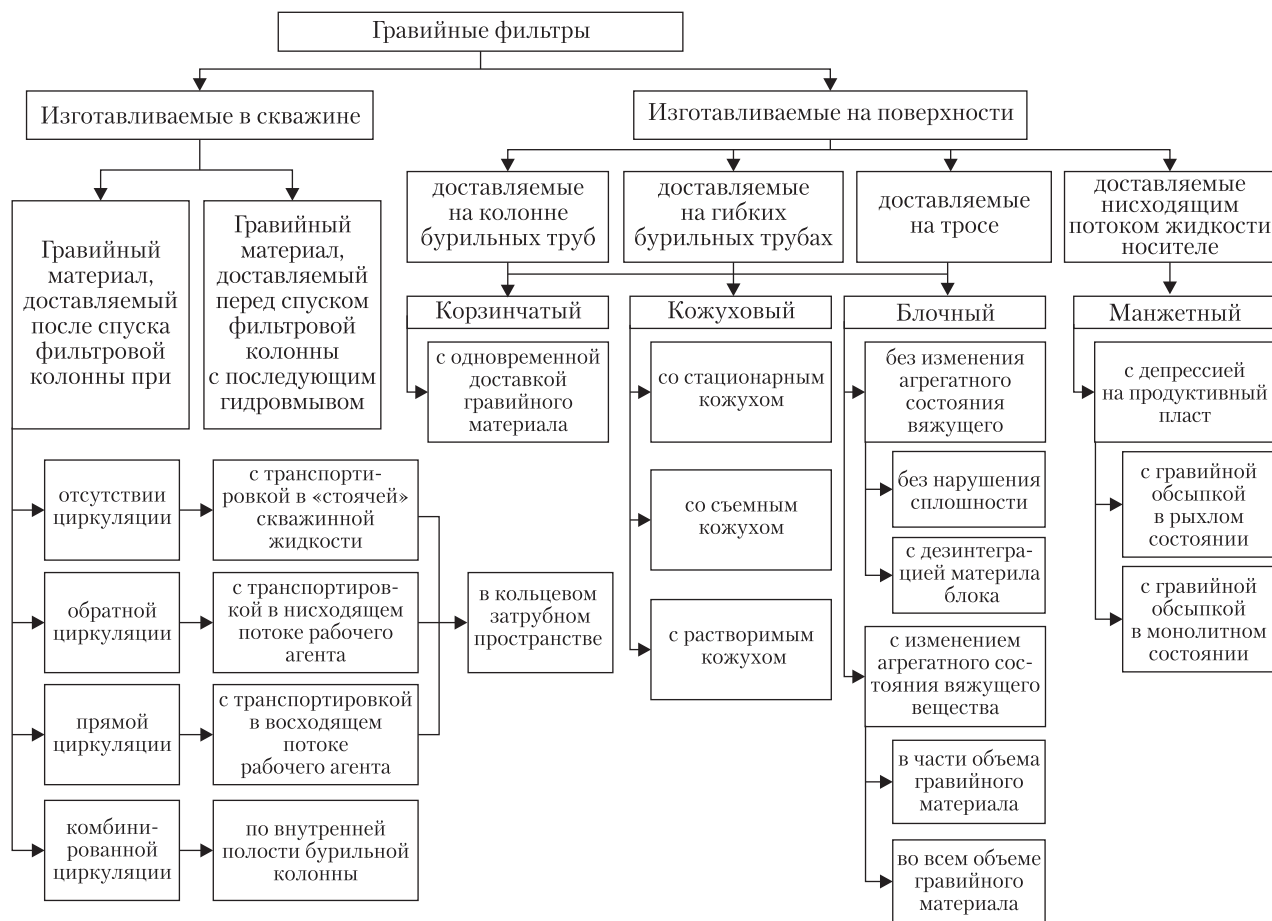


Рис. 1. Усовершенствованная классификация способов создания гравийных фильтров

все большую остроту. Это связано с тем, что практически все пресные источники оказались в той или иной степени загрязненными продуктами жизнедеятельности человека.

Решению этой актуальной, имеющей важное практическое значение проблемы, состоящей в научном обосновании параметров эффективной технологии создания гравийных фильтров буровых скважин, продуктивная часть которых представлена тонкозернистым песком, посвящена настоящая работа.

### ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЯ БУРОВЫХ СКВАЖИН КРИОГЕННО-ГРАВИЙНЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Более 60 % скважин на воду создаются в водоносных горизонтах, представленных рыхлы-

ми отложениями. Анализ геологических предпосылок оборудования буровых скважин криогенно-гравийными фильтрами показал, что при подборе размера гравия обсыпки пользуются рекомендациями для условий эксплуатации нефтяных и гидрогеологических скважин, из которых рекомендуемый диаметр частиц гравия обсыпки находится в широких пределах и может отличаться в разы.

Исходя из существующих рекомендаций для оборудования водоприемной части гидрогеологических скважин, представленной мелкозернистым песком, следует применять трубчатые или стержневые фильтры с одно-, двух- или трехслойной гравийно-песчаной обсыпкой. Также допускается применение блочных фильтров.

С целью расширения области применения гравийных фильтров, а следовательно, и привлечения для питьевого водоснабжения большего числа водоносных горизонтов, представленных тонкозернистым песком, предлагается применять криогенно-гравийные фильтры (КГФ), которые имеют диаметр частиц обсыпки водоприемной части скважин  $D_{50}$ , равный 0,5–0,75 мм.

Проведено районирование подземных вод Украины с учетом глубин залегания и температурного фактора, в ходе которого установлено, что температура пластовых вод при глубинах скважин до 250 м вне зависимости от времени года не превышает  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ввиду этого разработка параметров технологии оборудования буровых скважин и конструкция КГФ велась для холодных скважинных вод.

Техническими предпосылками применения КГФ являются:

- ✦ использование искусственного холода (при этом температура среды, в которой происходит замораживание КГФ, может изменяться в диапазоне  $-10 \div -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- ✦ использование гравийно-вязящей смеси, позволяющей использовать преимущества блочных фильтров при их транспортировке, и рыхлых обсыпок при добычи полезного ископаемого (при этом необходимо применять экологически чистые, т.е. органического происхождения минераловязящие вещества на водной основе, которые замедляют процесс растепления);
- ✦ температурный режим среды, который может изменяться от  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  при изготовлении до  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше при сборке КГФ и оборудовании ими буровых скважин (в этом случае обоснование выбора минераловязящего вещества и его массовой концентрации является первоочередной и наиболее важной задачей);
- ✦ конструктивные особенности фильтра: создаваемый на дневной поверхности при визуальном контроле КГФ должен иметь блочную конструкцию (рис. 2) и минимальный зазор между внутренним диаметром криогенно-

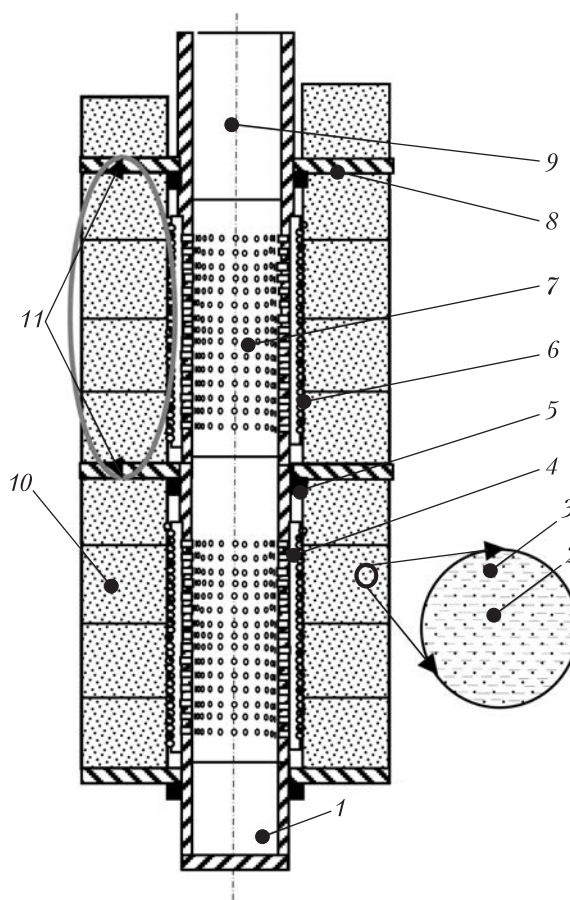


Рис. 2. Схема криогенно-гравийного фильтра: 1 – отстойник; 2 – материал гравийной обсыпки; 3 – минераловязящий материал; 4 – подкладные прутки; 5 – хомут; 6 – проволоочная обмотка; 7 – тручатый каркас фильтра; 8 – опорный элемент; 9 – надфильтровая труба; 10 – КГЭ; 11 – криогенно-гравийная секция

но-гравийного элемента фильтра (КГЭ) и наружным диаметром рабочей части фильтровой колонны.

Нами обоснованы параметры криогенно-гравийного элемента, к которым относятся их длины и радиальные размеры, массовые и объемные характеристики. Наружный диаметр блочного КГФ  $D_{КГФ}$  должен быть максимально приближен к фактическому диаметру водоприемной части буровой скважины.

Использование наиболее отличительных признаков при анализе технологий создания гра-

вийных фильтров и оборудования ими скважин дало возможность представить их в виде усовершенствованной классификации (см. рис. 1). В данной классификации наряду с практикуемыми способами создания гравийной обсыпки в водоприемной части скважин включены также способы, применение которых принципиально возможно после их соответствующей доработки. Структурно-генетический анализ, примененный при рассмотрении этих способов, дал возможность установить связь между ними и обобщить их по основным направлениям создания гравийных фильтров.

Все вышесказанное привело к разработке принципиально новой нетрадиционной технологии оборудования буровых скважин гравийными фильтрами. Разработанная технология предназначена для сложных геолого-технических условий оборудования и эксплуатации буровых скважин. Областью применения предлагаемой технологии является оборудование

буровых скважин различного целевого назначения криогенно-гравийными фильтрами в интервале продуктивных горизонтов, представленных тонкозернистым песком, с глубиной их залегания до 200 м.

Для реализации предлагаемой технологии необходимо выполнить следующие технологические операции:

- + изготовление на дневной поверхности КГЭ фильтра блочной конструкции;
- + сборка рабочей части КГФ, состоящего из криогенно-гравийных секций (КГС), собранных из КГЭ;
- + транспортировка КГФ по стволу скважины к продуктивному горизонту;
- + посадка КГФ в водоприемную часть скважины.

В табл. 1 приведена последовательность выполнения технологических операций, а также возможные варианты их осуществления.

После сборки в транспортном положении КГФ (рис. 3, а), состоящий из КГС, разделенных опорными элементами 6, жестко соединенных с каркасом фильтровой колонны 5, транспортируется по стволу скважины к водоприемной части 3.

Рассмотрена технология транспортировки КГФ по стволу скважины. Основными ее параметрами являются время, скорость и максимальная глубина транспортировки КГФ.

**Время транспортировки КГФ** на колонне буровых труб по стволу скважины (рис. 4) условно можно разбить на:

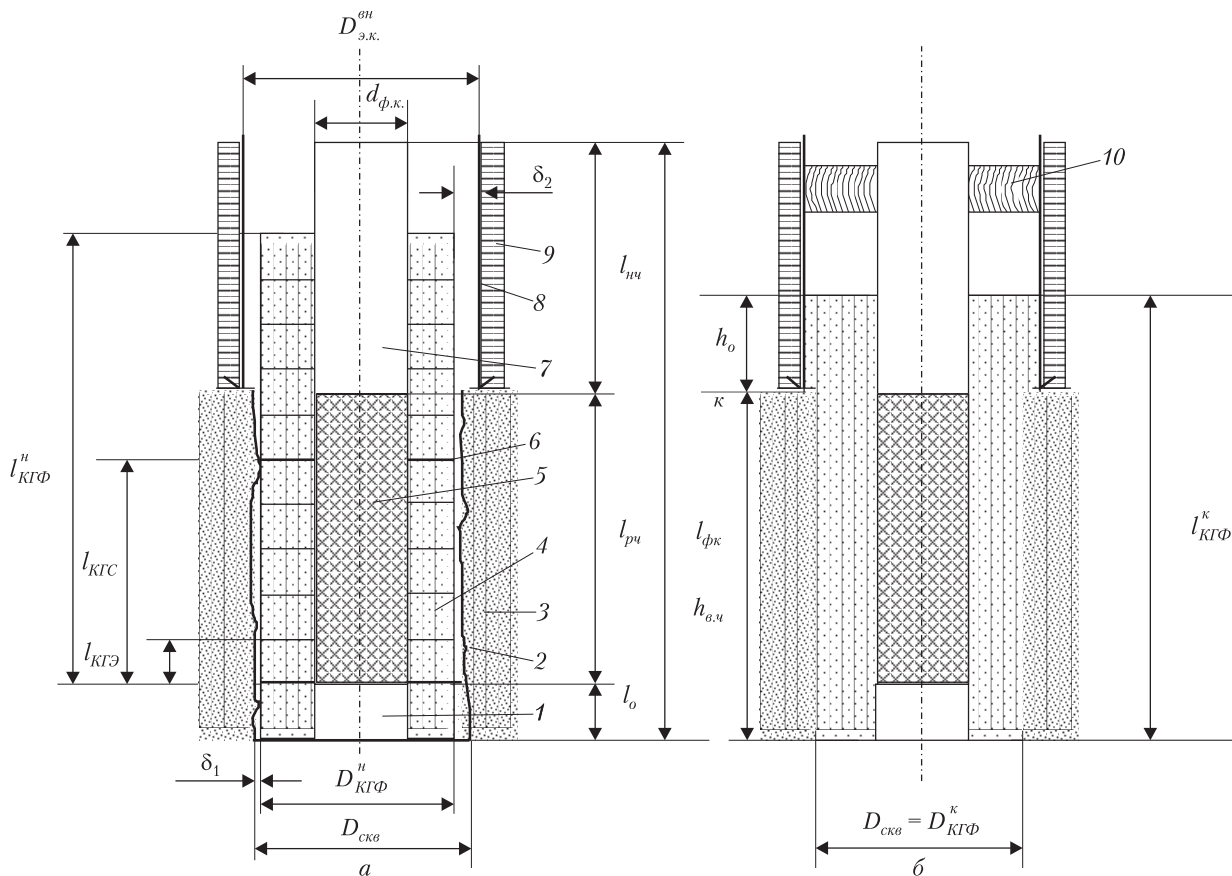
- +  $t_{cn}^{cm}$  — время транспортировки в воздушной среде по стволу скважины до статического уровня  $h_{cm}$ ;
- +  $t_{cn}^{0,cs}$  — время транспортировки КГФ в среде скважинной жидкости на остаток длины свечи;
- +  $t_{cn}^n$  — время наращивания буровой колонны;
- +  $t_{cn}^{cs}$  — время спуска одной свечи в водной среде,  $l_{cs}$  — длина свечи.

Под действием положительных температур водоносного горизонта происходит окончание

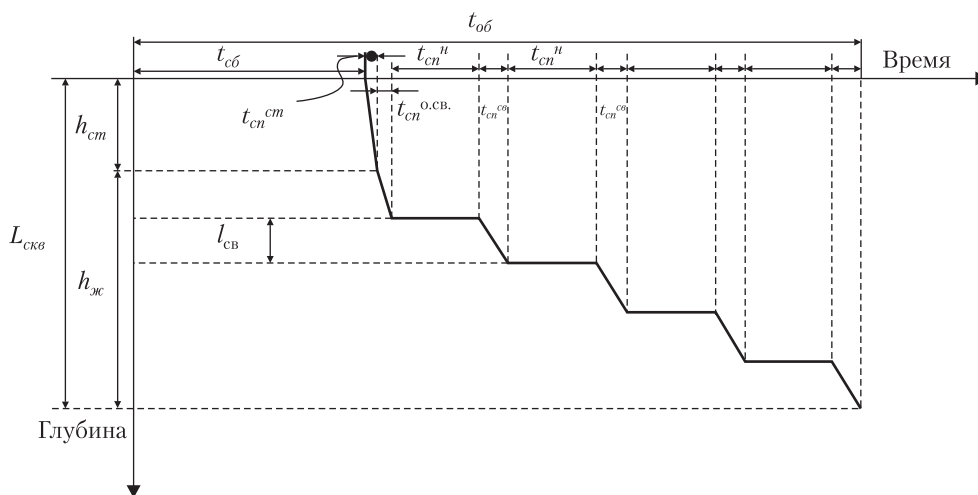
Таблица 1

**Технологические операции по оборудованию буровых скважин криогенно-гравийными фильтрами**

№ пор.	Технологические операции	Возможные способы осуществления операций
1	Изготовление КГЭ	в стационарных условиях предприятия; на буровой
2	Сборка КГФ	в стационарных условиях предприятия; на буровой
3	Транспортировка КГФ по стволу скважины	на колонне буровых труб; на гибких буровых трубах; на тросе
4	Посадка КГФ	в пилот-скважину малого диаметра с одновременным доведением водоприемной части до проектного диаметра; в водоприемной части скважины с проектным диаметром; с одновременным вскрытием водоприемной части скважины



**Рис. 3.** Схема оборудования криогенно-гравийными фильтрами водопримной части скважины: а – КГФ в исходном состоянии; б – КГФ в рабочем состоянии; 1 – отстойник; 2 – стенки водопримной части скважины; 3 – порода водопримной части скважины; 4 – КГЭ; 5 – рабочая часть фильтра; 6 – опорный элемент; 7 – надфильтовая труба; 8 – эксплуатационная колонна; 9 – цемент; 10 – сальник



**Рис. 4.** Схема затрат времени на оборудование скважины гравийными фильтрами

перехода КГФ из монолитного в рыхлое состояние с возникновением фильтрации пластовых вод сквозь гравийный материал. При этом минераловязущий материал приобретает реологические свойства пластовых вод.

На протяжении времени  $t_{об}$ , необходимого для осуществления всех технологических операций, блоки КГФ должны иметь достаточную механическую прочность.

Исходя из рис. 4,

$$t_{об} = \sum t_{cn}^n + \sum t_{cn}^{cb} + t_{cb} + t_{cn}^{cm} + t_{cn}^{o,cb}, \quad (1)$$

где  $\sum t_{cn}^n$  — суммарное время наращивания буровой колонны;  $\sum t_{cn}^{cb}$  — суммарное время спуска буровой колонны в среде скважинной жидкости.

В свою очередь

$$\sum t_{cn}^n = t_{cn}^n \cdot n_n, \quad \sum t_{cn}^{cb} = t_{cn}^{cb} \cdot n_{cn}, \quad (2)$$

где  $n_n$  — число операций по наращиванию колонны буровых труб;  $n_{cn}$  — количество свечей в колонне.

Для успешного выполнения работ по оборудованию водоносного горизонта необходимо, чтобы время разрушения КГФ  $t_{КГФ}$  превосходило время оборудования фильтром водоприемной части скважины  $t_{об}$ , т.е. должно выполняться условие

$$t_{КГФ} > t_{об}. \quad (3)$$

В свою очередь,  $t_{КГФ}$  зависит от рецептуры КГФ, длины КГС и условий теплообмена. Подбор рецептуры должен осуществляться с учетом конкретных геолого-гидрогеологических условий бурения скважин и должен быть не меньше

$$t_{КГФ} = k \cdot t_{об}, \quad (4)$$

где  $k$  — коэффициент запаса времени, связанный с устранением последствий возможных осложнений, возникших при оборудовании гравийными фильтрами водоприемной части буровой скважины.

**Скорость транспортировки КГФ.** При транспортировке КГФ ствол скважины заполнен жидкостью. КГФ спускается на колонне

труб с контролируемой скоростью. Следовательно, вытесняемая фильтром жидкость должна подниматься вверх по кольцевому заfiltrовому пространству со средней скоростью обтекания  $U_{обт}$  КГФ

$$U_{обт} = U_{кн} = U_{КГФ} \frac{F_{КГФ}}{F_{КП}^\phi}, \quad (5)$$

где  $F_{КП}^\phi$  — площадь сечения кольцевого заfiltrового пространства.

**Максимальная глубина транспортировки** КГФ зависит и от статического уровня жидкости в скважине  $h_{cm}$ . Следовательно, максимально возможная глубина транспортировки КГФ определится как

$$L_{max} = h_{cm} + h_{жс}, \quad (6)$$

где  $h_{жс}$  — длина транспортировки КГФ по стволу скважины в водной среде.

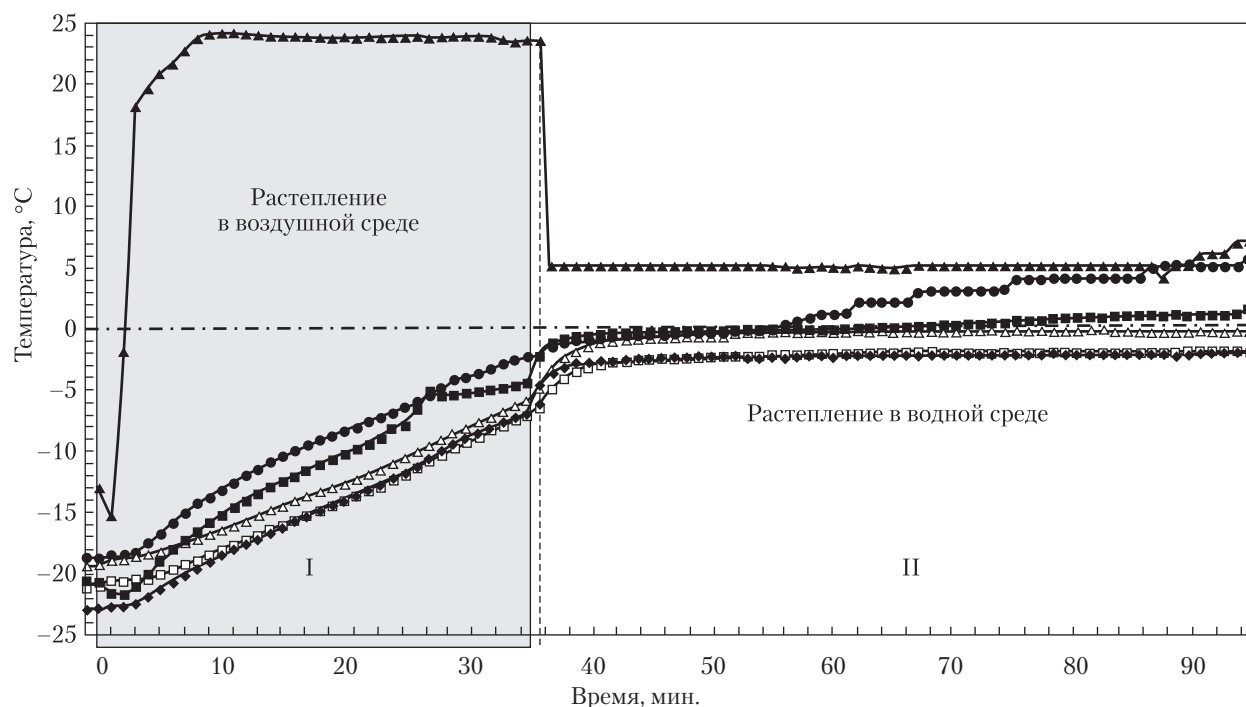
Особое внимание уделено выбору минераловязущего вещества. С этой целью произведен анализ применяемых в буровой практике минераловязущих и структурообразующих материалов; сформулированы требования, которым должны отвечать минераловязущие вещества блочных гравийных фильтров; разработана классификация вязущих материалов. На основании всестороннего анализа и проведенных исследований показано, что полнее всего технологическим, экономическим и экологическим требованиям отвечает пищевой желатин марки П-11.

Экспериментальными исследованиями технологии изготовления криогенно-гравийных элементов фильтра установлено влияние рецептуры минераловязущего вещества на физико-механические свойства материала КГФ, а также обоснована технология изготовления КГЭ фильтра.

Исследования проводились в два этапа.

**На первом этапе** исследовали минераловязущее и криогенно-гравийный композит (КГК) фильтра. В результате исследования определены:

→ реологические свойства водного раствора желатина как вязущего вещества. Установ-



Примечание: ● — термопара № 1; △ — термопара № 2; □ — термопара № 3; ◆ — термопара № 4; ■ — термопара № 5; ▲ — термопара № 6

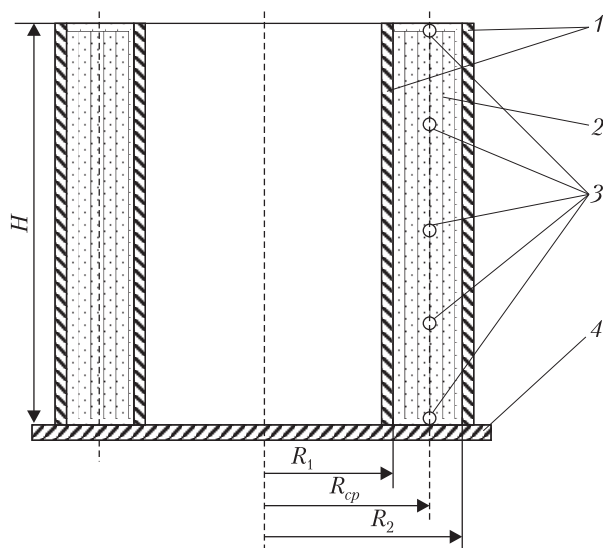
Рис. 5. Изменение температуры в экспериментальном цилиндрически полом образце КГЭ фильтра с 5%-й массовой концентрацией вяжущего вещества при его растеплении в воздушной и водной среде при  $t_{\text{г}} = +5 \text{ } ^\circ\text{C}$

лено, что использование водных растворов желатина в качестве вяжущего вещества возможно. Показано, что процесс смешивания компонентов КГК фильтра необходимо производить при температуре водных растворов желатина не ниже  $33 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

- ✦ физико-механические свойства КГК. Установлена динамика изменения прочностных характеристик в зависимости от среды его пребывания, плотности, влажности образцов и концентрации вяжущего. Показано, что наибольшую прочность имеют образцы КГК с 100%-й влажностью. При этом с увеличением массовой концентрации желатина в образцах КГК при их растеплении в водной среде происходит повышение прочностных характеристик образцов КГК в 1,5–2 раза. Повышение температуры воды до  $17 \text{ } ^\circ\text{C}$  приводит к их снижению на 20 % в начальный период и на порядок после 30 мин выдержки.

**На втором этапе** исследовали технологию изготовления КГЭ фильтра буровых скважин. При этом:

- ✦ определены физико-механические свойства экспериментальных образцов КГЭ фильтра во времени и средах. Показано, что максимальная длина КГС фильтра не зависит от ее диаметра и при температуре скважинной жидкости  $+17 \text{ } ^\circ\text{C}$  должна составлять:
  - не более 3 м при массовой концентрации желатина в водном растворе 3 %;
  - не более 4 м при массовой концентрации 5 %;
  - не более 5 м при массовой концентрации 10 %;
  - не более 7,2 м при массовой концентрации желатина 15 %;
  - не более 11 м при массовой концентрации желатина в водном растворе 30 %;
- ✦ обоснована необходимость введения в состав фильтровой колонны разгрузочных, опорных



**Рис. 6.** Схема к расчету КГЭ: 1 – корпус формы; 2 – композит КГЭ фильтра; 3 – контрольные точки; 4 – основание формы

элементов (рис. 1), устанавливаемых между КГС при длине рабочей части фильтра более длины КГС;

- ✦ определено изменение температурных полей в экспериментальном образце КГЭ фильтра в лабораторных условиях, в результате которых показано, что:
  - для заморозки КГЭ фильтра с толщиной стенки 35 мм достаточно затратить 10–12 ч;
  - концентрация вяжущего вещества в композите не оказывает существенного влияния на технологические процессы заморозки при изготовлении КГЭ и растеплении;
  - «жизнеспособность» КГЭ фильтра существенно зависит от среды растепления и ее температуры;
  - в воздушной среде фазовый переход вяжущего вещества при температуре окружающей среды + 20 °С происходит по истечении 1,5 ч;
  - в неподвижной водной среде с температурой +5 °С фазовый переход вяжущего КГЭ фильтра происходит по истечении 60 мин (рис. 5).

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нами были проведены теоретические исследования теплопереноса в пористой крупно-

дисперсной среде КГЭ фильтра при его заморозке и растеплении в процессе сборки на дневной поверхности и транспортировке КГФ по стволу скважины. В качестве инструмента исследования выбраны методы математического моделирования с проведением вычислительного эксперимента. Физическая модель гравийного фильтра представляет собой цилиндрический образец, который состоит из гравия (минеральная составляющая) и воды (дисперсионная среда). Дисперсионная среда, исходя из технологии изготовления КГЭ фильтра, в ее начальный период находится в жидком состоянии, а при понижении температуры композита КГЭ в целом ниже температуры фазового перехода – в твердом. Таким образом, дисперсионная среда претерпевает фазовый переход и сформулированная задача сводится к решению задачи Стефана.

На рис. 6 показана расчетная модель образца КГЭ фильтра. На представленной схеме показаны контрольные точки 1–5, по отношению к которым ниже показаны численные результаты расчета.

Для решения задачи заморозки пористой крупнодисперсной среды КГЭ фильтра используем дифференциальное уравнение теплопереноса в дисперсной водонасыщенной среде с использованием метода эффективной теплоемкости:

$$c_{ef}(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (7)$$

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

где  $R_1$  и  $R_2$  – внутренний и внешний радиусы КГЭ фильтра;  $H$  – высота КГЭ фильтра.

Начальные и граничные условия запишем в виде:

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

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial s}\Big|_n = \bar{\alpha}(T|_s - T_\infty), \quad (8)$$

где  $T_\infty$  – температура в морозильной камере;  $n$  – внешняя нормаль к поверхности;  $\bar{\alpha}$  – средний коэффициент теплоотдачи, который зави-



сит от режима теплообмена и формы образца КГЭ фильтра.

Функция льдистости  $i(T)$  определяется на основании экспериментальных данных про фазовые переходы в крупнодисперсных средах и может быть аппроксимирована выражением вида

$$i(T) = i_k \frac{1 - e^{-m(T-T_H)}}{1 - e^{-m(T_K-T_H)}}, \quad (9)$$

где  $i_k$  — значение льдистости при температуре  $T_K$ , которое зависит от количества прочносвязанной влаги;  $T_H$ ,  $T_K$  — температуры начала и конца фазового перехода соответственно;  $\alpha$  — коэффициент, который характеризует степень связанности воды с горной породой;  $m$  — коэффициент, зависящий от дисперсности и структурного состава пористого материала.

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

В (7) используется понятие эффективной теплоемкости, которая является аддитивной величиной и определяется как

$$c_{ef}(T) = (1 - \Pi) \cdot c_{sk} + \Pi \cdot i(T) \cdot U_0 \cdot c_l + \Pi \cdot (1 - i(T)) \cdot U_0 \cdot c_t + \frac{\rho_l}{\rho} \cdot \Pi \cdot l \cdot \frac{di}{dT}, \quad (10)$$

где  $\Pi$  — пористость;  $c_{sk}$ ,  $c_p$ ,  $c_t$  — теплоемкости горной породы, льда и воды соответственно;  $\rho_l$  — плотность льда.

Коэффициент теплопроводности дисперсионной среды КГФ определим как

$$\lambda = \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1)(1 - i(T)), \quad (11)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — коэффициенты теплопроводности мерзлой и талой фаз определяются как

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

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

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  вычисляется в зависимости от режима теплообмена с окружающей средой образца КГЭ фильтра.

Задача (7)–(11) является нелинейной. Ее решение было получено численным методом

конечных разностей. Результаты исследования заморозки КГЭ фильтра (7)–(8) по вышеописанному алгоритму представлены на рис. 7.

Для этапа заморозки КГФ начальная температура образца  $T_0 = 25$  °С, а температура в морозильной камере равняется  $-20$  °С. Как видно из рис. 7, фазовый переход *вода–лед* на поверхности КГЭ фильтра начинается приблизительно через 1 ч и заканчивается в центральной его части через 3 ч после начала заморозки. Через 10–12 ч температура КГЭ фильтра выравнивается и принимает значение  $-18$  –  $-20$  °С.

Во время сборки КГФ КГЭ фильтра подвергается влиянию внешней среды, т. е. происходит его растепление в воздушной среде. Для определения допустимого времени нахождения фильтра на дневной поверхности, аналогично процессу изготовления фильтра, использовано дифференциальное уравнение теплопереноса (7) с применением метода эффективной теплоемкости с начальными и граничными условиями (8).

Средний коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}_g$  рассчитывался для вертикального полого цилиндра, который находится в условиях свободно-го конвективного переноса:

$$Nu_\infty = 0,75 \cdot (Gr \cdot Pr_\infty)^{0,25} \cdot \left( \frac{Pr_\infty}{Pr_s} \right)^{0,25},$$

где  $Gr$  — критерий Грасгофа, определяемый из

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_\infty - T_s) \cdot H^3}{\nu^2},$$

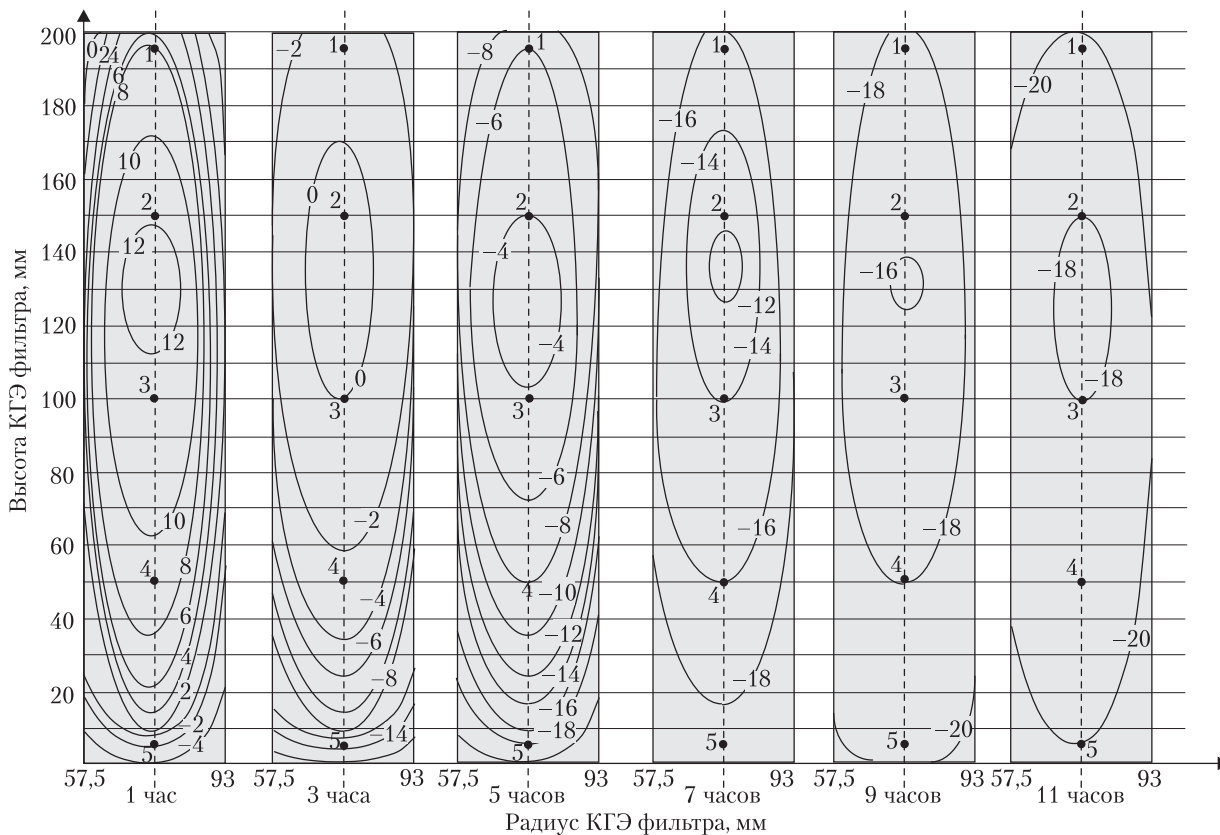
где  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости среды.

Тогда средний коэффициент теплоотдачи для растепления в воздушной среде

$$\bar{\alpha}_g = \frac{Nu_\infty \cdot \lambda_g}{d_2}, \quad (12)$$

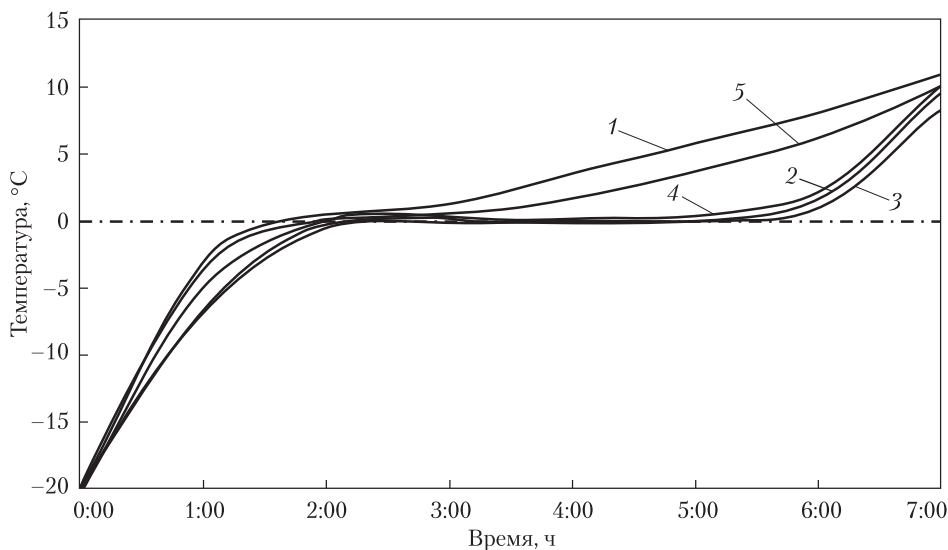
где  $\lambda_g$  — коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $T_\infty$ .

Теплофизические параметры решаемой задачи определяются так же, как и в предыдущем случае. Результаты численного решения представлены на рис. 8.



Примечание: ● — контрольные точки

Рис. 7. Температурные поля в °С в КГЭ фильтра с 5%-й массовой концентрацией в процессе заморозки в ларе



Примечание: 1, 2, 3, 4, 5 — контрольные точки; — — — — граница фазового перехода

Рис. 8. Расчетное изменение температуры в процессе растепления КГЭ фильтра с 5%-й массовой концентрацией вяжущего вещества в воздушной среде

Для определения максимального времени спуска КГФ в водопримемную часть скважины используем математический подход (7)–(8), который применялся для определения параметров технологии изготовления КГЭ фильтра и сборки КГФ.

Криогенно-гравийный фильтр транспортируется в воздушной среде по стволу скважины до статического уровня и в среде скважинной жидкости до забоя. При определении коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  во время транспортировки КГФ на колонне труб по стволу скважины учитывалось, что в момент наращивания свечи фильтр находится в состоянии покоя, а при спуске – гидродинамического воздействия скважинной жидкости.

Во время этапа наращивания бурильной колонны для определения коэффициента теплоотдачи используем зависимость  $\bar{\alpha}_g$  (12).

При спуске КГФ используем выражение определения  $\bar{\alpha}_2$  для вертикального полого ци-

линдра, который находится в условиях вынужденной конвекции. Тогда

$$Nu = 0,24 \cdot Re^{0,43} Pr^{0,33},$$

где  $Re$  – число Рейнольдса, а коэффициент теплоотдачи

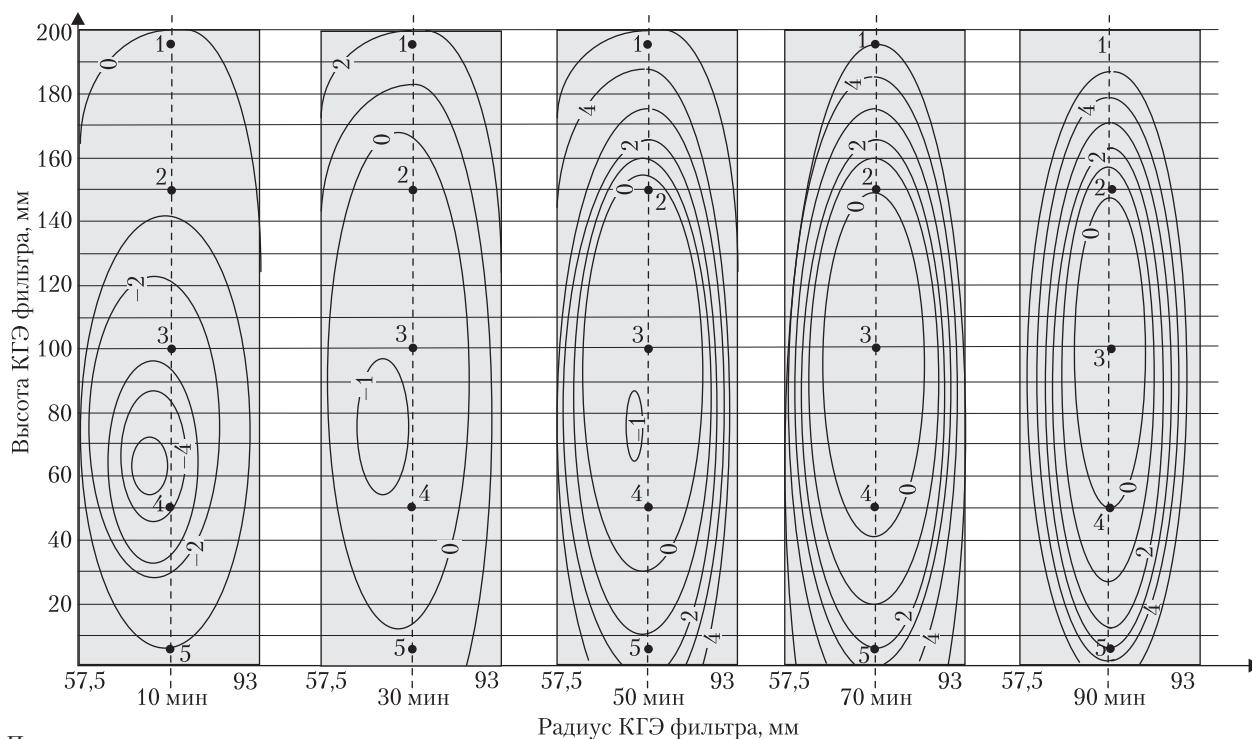
$$\bar{\alpha}_2 = \frac{Nu \cdot \lambda_2}{d_2}. \quad (13)$$

В общем случае коэффициент теплоотдачи в граничных условиях  $\alpha = f(\tau)$  с учетом (12), (13) используется средний по времени

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{t_{об}} \int_0^{t_{об}} \bar{\alpha}_i(\tau_i) d\tau, \quad (14)$$

где  $\bar{\alpha}_i$  и  $\tau_i$  – коэффициент теплоотдачи и время цикла соответственно при наращивании  $\bar{\alpha}_g$  и спуске  $\bar{\alpha}_2$  КГФ по стволу скважины;  $t_{об}$  – время транспортировки КГФ по стволу скважины.

Результаты численного решения задачи (7)–(8) приведены на рис. 9.



Примечание: ● – контрольные точки

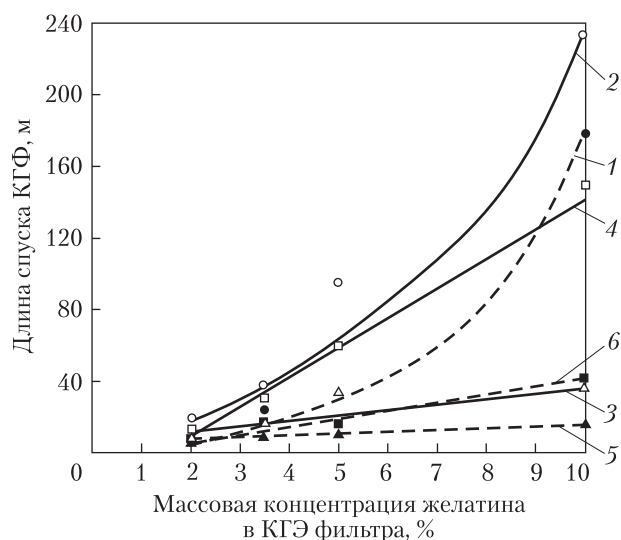
Рис. 9. Температурное поле в КГЭ фильтра с 5%-й массовой концентрацией в процессе его транспортировки по стволу скважины в водной среде при  $T_{\infty} = +5^{\circ}C$

Расхождение между экспериментальными и расчетными данными в среднем по всем термодинамическим параметрам составляет 5 %, максимальное отклонение между данными составило 20 %. Полученное расхождение является вполне удовлетворительным и свидетельствует о возможности применения математической модели для исследования теплопереноса в КГЭ.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью стендовых исследований являлось определение параметров процесса транспортировки КГФ по стволу буровой скважины на глубину его спуска. При проведении стендовых исследований технологии транспортировки КГЭ фильтра по стволу буровой скважины моделировались самые сложные условия спуска КГФ, характеризующиеся:

✦ низкой скоростью транспортировки КГФ по стволу скважины;



*Примечание:* 1 — 1 м КГС при  $t_{\text{с}} = +17^{\circ}\text{C}$ ; 2 — 1 м КГС при  $t_{\text{с}} = +5^{\circ}\text{C}$ ; 3 — 2 м КГС при  $t_{\text{с}} = +17^{\circ}\text{C}$ ; 4 — 2 м КГС при  $t_{\text{с}} = +5^{\circ}\text{C}$ ; 5 — 3 м КГС при  $t_{\text{с}} = +17^{\circ}\text{C}$ ; 6 — 3 м КГС при  $t_{\text{с}} = +5^{\circ}\text{C}$

**Рис. 10.** Зависимость максимальной длины спуска КГФ с закрытым башмаком от концентрации минераловязующего вещества в КГЭ фильтра при  $U_{\text{КГФ}} = 0,22$  м/с

✦ использованием укороченных надфильтровых труб с проведением СПО «на вынос».

Стендовые исследования осуществляли в модели скважины, выполненной из прозрачных труб (внутренний диаметр — 200 мм) для визуализации хода эксперимента. Моделирование транспортировки КГФ по стволу скважины проводилось таким образом:

✦ спуск КГФ в неподвижной жидкости скважины моделировался обтеканием неподвижного фильтра, установленного в модели скважины, водой, подаваемой насосом;

✦ отсутствие движения КГФ в реальной скважине при наращивании буровых труб моделировалось паузой в подаче воды насосом на стенде;

✦ скорость спуска КГФ в скважине моделировалась скоростью движения воды, подаваемой насосом, т.е. подачей насоса. Подача насоса составляла 88; 180 и 360 л/мин;

✦ время спуска КГФ на длину свечи моделировалось временем подачи воды насосом;

✦ время наращивания буровых труб моделировалось временем паузы в подаче насоса.

Каркас фильтра — стальной сетчатый с наружным диаметром 114 мм по сетке, диаметр трубы — 108 мм. Наружный диаметр КГЭ составлял 186 мм, внутренний — 115 мм. Длина КГЭ в опытах — 200 мм, длина КГС моделировалась нагружением КГЭ массой дополнительных стальных грузов, что обеспечивало эквивалентную длину КГС в один, два и три метра.

Стендовые исследования проводились при температуре воды  $+5$  и  $+17^{\circ}\text{C}$ .

При исследованиях были проведены две серии опытов: 1) башмак отстойника фильтра открыт; 2) башмак отстойника фильтра закрыт.

Результаты стендовых исследований экспериментальных образцов КГЭ фильтра приведены в табл. 2.

В качестве критерия оценки достижения максимальной глубины транспортировки КГФ по стволу скважины принят момент разрушения КГЭ с образованием зияющих пустот. Эта глу-

Таблица 2

Результаты стендовых исследований технологии транспортировки КГФ

Насос		Время		Скорость спуска КГФ, $U_{КГФ}$ , м/с	Массовая концентрация желатина, $C_{ж}$ , %	Масса дополнительного груза, кг	Эквивалентная длина КГС, м	Средняя глубина транспортировки КГЭ по стволу скважины				
тип насоса	подача $Q$ , л/мин.	паузы подачи насоса (время наращивания инструмента) $t_{пауз}$ , с.	подачи насоса (время спуска КГФ), $t_{подач}$ , с					с открытым башмаком при $t_e = +17$ °С	с закрытым башмаком при $t_e = +17$ °С	с открытым башмаком при $t_e = +5$ °С	с закрытым башмаком при $t_e = +5$ °С	
НБ- 5	88	120	40	0,05	2	24	1	10,8	10,8	21,6	17,3	
						54	2	8,6	4,3	15,1	15,1	
						84	3	4,3	4,3	8,6	10,8	
						3,5	24	1	19,4	19,4	17,3	19,4
						54	2	13,0	15,1	15,1	13,0	
						84	3	8,6	8,6	13,0	13,0	
	5	24	1	17,3	30,2	60,5	64,8					
		54	2	8,6	21,6	36,7	56,2					
		84	3	6,5	10,8	17,3	19,4					
		10	24	1	86,4	103,7	110,2	127,4				
		54	2	15,1	23,8	56,2	86,4					
		84	3	10,8	13,0	19,4	28,1					
НБ- 5	180	120	20	0,11	2	24	1	8,8	11,0	13,2	15,4	
						54	2	4,4	4,4	11,0	15,4	
						84	3	4,4	4,4	8,8	11,0	
						3,5	24	1	15,4	17,6	22,0	28,6
						54	2	11,0	11,0	17,6	22,0	
						84	3	8,8	8,8	11,0	24,2	
	5	24	1	15,4	33,0	59,4	77,0					
		54	2	8,8	15,4	33,0	44,0					
		84	3	6,6	11,0	17,6	26,4					
		10	24	1	121,0	154,0	160,6	167,2				
		54	2	81,4	110,0	94,6	125,4					
		84	3	11,0	13,2	24,2	33,0					
НБ-5 + НБ-32	360	120	10	0,22	2	24	1	6,6	6,6	15,4	17,6	
						54	2	6,6	4,4	11,0	13,2	
						84	3	4,4	4,4	8,8	8,8	
						3,5	24	1	22,0	24,2	35,2	37,4
						54	2	13,2	13,2	30,8	28,6	
						84	3	11,0	8,8	15,4	15,4	
	5	24	1	19,8	17,6	72,6	92,4					
		54	2	13,2	15,4	41,8	55,0					
		84	3	8,8	11,0	24,2	33,0					
		10	24	1	138,6	176,0	200,2	231,0				
		54	2	22,0	33,0	118,8	149,6					
		84	3	13,2	13,2	28,6	37,4					

бина определялась с учетом количества циклов подачи и паузы в работе насоса.

В результате проведения стендовых исследований технологии транспортировки КГФ в водоприемную часть буровой скважины установлено, что:

1) при контакте двухкомпонентного экспериментального образца КГЭ фильтра с промывочной жидкостью происходит его быстрое разрушение. Максимальная длина его спуска не превышает 3 м;

2) применение в качестве вяжущего вещества водного раствора органического полимера, которым является пищевой желатин марки П-11, возможно для изготовления КГЭ фильтра. А это значит, что разрабатываемая и исследуемая технология оборудования буровых скважин фильтрами может быть применена для создания фильтров в самых сложных геолого-гидрогеологических условиях, когда порода водоносного горизонта представлена тонкозернистым песком;

3) длина спуска зависит от условий теплообмена: концентрации вяжущего вещества; массы КГС; скорости спуска КГФ по стволу скважины; температуры скважинной жидкости; состояния башмака фильтровой колонны (рис. 10):

- ✦ длина спуска прямо пропорционально зависит от скорости спуска КГФ по стволу скважины;
- ✦ увеличение скорости спуска КГФ по стволу скважины КГЭ с массовой концентрацией желатина 2–5 % в большинстве случаев не приводит к увеличению длины оборудования буровой скважины фильтрами. Увеличение длины характерно для КГЭ с массовой концентрацией желатина более 5 %;
- ✦ на максимальную длину спуска КГФ существенное влияние оказывает температура скважинной жидкости. Так, при сохранении параметров транспортировки КГФ по стволу скважины можно увеличить ее макси-

Таблица 3

Длины транспортировки КГФ в зависимости от длины КГС при разной массовой концентрации желатина

Массовая концентрация желатина в КГЭ, %	Длина КГС, м		
	1 м	2 м	3 м
2	до 20	до 15	до 10
3,5	20–35	15–30	10–25
5	35–90	30–55	25–30
10	90–230	55–150	30–40

Таблица 4

Результаты стендовых исследований технологии транспортировки 2-метровых КГС при  $t_g = +17^\circ\text{C}$  и длине свечи 10 м

Насос		Время, с			$U_{\text{КГФ}}$ , м/с	Массовая концентрация желатина, $C_{\text{ж}}$ , %	Среднее значение	
тип насоса	$Q$ , л/мин	$t_{\text{паузы}}$	$t_{\text{подачи}}$	цикла, $t_{\text{ц}}$			количество циклов	длины спуска
НБ-5	88	120	200	320	0,05	3,5	4	40,0
						5	5	50,0
НБ-5	180	120	90	210	0,11	3,5	3	30,0
						5	5	50,0

мальную длину оборудования фильтрами в среднем в 2–3 раза;

4) рекомендуемая максимальная длина оборудования водоприемной части буровой скважины фильтрами, транспортируемой на колонне с закрытым башмаком в холодных скважинных водах, при скорости его транспортировки по стволу скважины 0,22 м/с приведена в табл. 3;

5) существенным фактором для увеличения длины оборудования фильтрами буровых скважин является увеличение длины свечи бурильных труб. За счет увеличения длины свечи в 5 раз (табл. 4), при сохранении неизменным времени наращивания бурильных труб можно увеличить длину спуска в 3 раза. Так:

- ✦ при массовой концентрации 3,5 % длина спуска увеличилась на 27 м (с 13 до 40 м при подаче насоса 88 л/мин) и на 19 м (с 11 до 30 м при 180 л/мин);
- ✦ при массовой концентрации 5 % длина спуска увеличилась на 41,2 м (с 8,8 до 50 м при подаче насоса 88 л/мин и 180 л/мин).

#### **ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОРУДОВАНИЯ БУРОВЫХ СКВАЖИН КРИОГЕННО-ГРАВИЙНЫМИ ФИЛЬТРАМИ**

Производственные испытания технологии оборудования фильтрами гидрогеологических скважин производились в период с декабря 2011 г. по апрель 2013 г. при участии персонала и стандартного бурового оборудования коммерческих предприятий БК «Азовнерудгеология» в населенных пунктах Балково Токмакского района Запорожской области и Николаевка Васильковского района Днепропетровской области, ООО Промышленно-геологической группы «Днепрогидрострой» — в населенных пунктах Ждановка и Лычково Магдалиновского района, а также Мусиевка Криворожского района Днепропетровской области. В результате опытно-промышленного внедрения было установлено следующее:

1. Разработанная технология изготовления криогенно-гравийных элементов фильтра позволяет применять ее в условиях буровой.

2. Разработанная технология транспортировки криогенно-гравийного фильтра по стволу скважины и примененное стандартное технологическое оборудование и инструмент не усложняет процесс оборудования водоприемной части гидрогеологической скважины гравийным фильтром, а упрощает его.

3. Технология изготовления криогенно-гравийных элементов фильтра позволяет улучшить процесс изготовления гравийного фильтра за счет формирования обсыпки на дневной поверхности.

4. Экономический эффект от применения технологии оборудования водоприемной части одной гидрогеологической скважины блочным криогенно-гравийным фильтром составляет 6–8 тыс. грн.

5. Разработанные технологии изготовления криогенно-гравийного элемента фильтра и транспортировки криогенно-гравийного фильтра по стволу скважины могут применяться при сооружении гидрогеологических скважин.

#### **ВЫВОДЫ**

Решена актуальная научная проблема, посвященная обоснованию технологий изготовления КГЭ фильтра и оборудования водоприемной части буровой скважины криогенно-гравийным фильтром.

Обоснованы рецептуры минераловязущего вещества и криогенно-гравийного композита, установлена закономерность влияния физических полей на изменение свойств минераловязущего вещества, криогенно-гравийного композита и элемента фильтра.

Установлены закономерности влияния технологических операций по оборудованию водоприемной части буровой скважины на изменение физико-механических, теплофизических и технологических свойств экспериментального криогенно-гравийного элемента фильтра.

Теоретически обоснованны и экспериментально (в стендовых и производственных условиях) отработаны параметры технологии доставки к водоприемной части буровой скважины криогенно-гравийного фильтра.

А.О. Кожевников<sup>1</sup>, А.К. Судаков<sup>1</sup>, А.Ю. Дреус<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Державний вищий навчальний заклад  
«Національний гірничий університет»,  
Дніпропетровськ

<sup>2</sup> Дніпропетровський національний університет  
ім. О. Гончара, Дніпропетровськ

НАУКОВІ ОСНОВИ ІННОВАЦІЙНОЇ  
ТЕХНОЛОГІЇ ОБЛАДНАННЯ БУРОВИХ  
СВЕРДЛОВИН КРІОГЕННО-ГРАВІЙНИМИ  
ФІЛЬТРАМИ

Наведено технології виготовлення кріогенно-гравійного елемента фільтра і обладнання водоприймальної частини бурової свердловини кріогенно-гравійним фільтром. Обґрунтовано рецептури мінеральної в'язучої речовини і кріогенно-гравійного композиту. Встановлено закономірності впливу фізичних полів на зміну їх властивостей і технологічних операцій з обладнання водоприймальної частини бурової свердловини на зміну фізико-механічних, теплофізичних і технологічних властивостей експериментального кріогенно-гравійного елемента фільтра. Теоретично і експериментально відпрацьовано параметри технології доставки до водоприймальної частини бурової свердловини кріогенно-гравійного фільтра.

*Ключові слова:* бурова свердловина, кріогенна технологія, кріогенно-гравійний фільтр, желатин.

A.A. Kozhevnikov<sup>1</sup>, A.K. Sudakov<sup>1</sup>, A.Yu. Dreus<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Higher Education Institution  
«National Mining University», Dnipropetrovsk  
<sup>2</sup> O. Honchar Dnipropetrovsk National University,  
Dnipropetrovsk

SCIENTIFIC BASES OF INNOVATIVE  
TECHNOLOGY OF DRILL-HOLE EQUIPMENT  
BY CRYOGENIC-GRAVEL FILTERS

Manufacturing technologies of cryogenic-gravel filter element and equipment of drill-hole water receiving part by a cryogenic-gravel filter are described. Compoundings of mineral binder and cryogenically-gravel composition are substantiated. Patterns of physical fields influence on the change of their properties and technological operations of equipping drill-hole water receiving part on changes of physical, mechanical, thermal and technological properties of experimental cryogenic gravel filter element are established. Parameters of delivery technology of cryogenic-gravel filter to drill-hole water receiving part are theoretically and experimentally worked out.

*Keywords:* drill-hole, cryogenic technology, cryogenic-gravel filter, gelatin.

Стаття надійшла до редакції 10.11.14