

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

УДК: 504.064.47, 504.4.054, 551.493, 626.862.4

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЩЕЛЕВЫХ  
ДРЕНАЖНЫХ ВЫРАБОТОК

*О.С. БРЮХОВЕЦКИЙ, И.П. ГАНИН, И.Ю. НАЙДЕНКО*

*Российский государственный геологоразведочный университет  
117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая ул., 23; e-mail: bos.rggru@mail.ru*

В связи с решением актуальной экологической проблемы по ограничению миграции опасных загрязнений в подземных водоносных горизонтах рассмотрен вопрос о целесообразности применения вертикальных щелевых дренажей взамен скважинных. Миграции загрязнений ограничиваются с помощью сооружения перехватывающих дренажных систем и откачки по ним подземных вод, проходящих через загрязнённый участок водоносного горизонта. Перехватывающие дренажные системы предлагается сооружать с использованием технических средств скважинной гидромеханизации, кратко рассмотрена технология их применения. С использованием средств компьютерной математики исследован вопрос о влиянии увеличения числа скважин при фиксированной длине ряда (плотности ряда) на гидравлическое сопротивление скважин линейного дренажа. Предложено максимальное сближение скважин заменять щелевым дренажом, сооружаемым с применением средств скважинной гидромеханизации.

Ключевые слова: вертикальные скважинные и щелевые дренажи; технические средства скважинной гидромеханизации; миграции опасных загрязнений; расчет дренажей; фильтрационные сопротивления.

THE JUSTIFICATION OF THE SLOTTED DRAINS USEFULNESS

*O.S. BRUKHOVETSKY, I.P. GANIN, I.YU. NAIDENKO*

*Russian State Geological Prospecting University  
117997, Russia, Moscow, Miklouho-Maklay's street, 23, e-mail: bos@msgpa.ru, bos.rggru@mail.ru*

In connection with the solution of actual environmental problems of limiting the migration of hazardous contaminants in groundwater aquifers, the appropriateness of vertical slot drains instead of wells is considered. Migration of contaminants is limited by the construction of interceptor drains and pumping through them the underground water passing through the contaminated area of the aquifer. Intercepting drainage system is proposed to be constructed with use of technical means for downhole jetting. The technology of their application is briefly considered. With the use of computing mathematics, the effect of increasing the number of wells in a line of fixed length (density of line) on the hydraulic resistance of linear drainage wells is studied. The extreme convergence of wells is proposed to be replaced by the slot drain, constructed using the means of downhole jetting.

Key words: vertical wells and slotted drains; technical means of downhole jetting; migration of hazardous contaminants; calculation of drainage; filtration resistance.

Проектирование, строительство и эксплуатация карьеров, подземных хранилищ жидких и твёрдых отходов промышленных предприятий, разработка

и реализация проектов консервации и ликвидации подобных хранилищ в обязательном порядке предусматривают проведение специальных водоох-

ранних мероприятий. Решение задачи ограничения миграции загрязнений в подземных водоносных горизонтах осуществляется с помощью сооружения перехватывающих эти загрязнения дренажных систем и откачку по ним подземных вод, проходящих через загрязнённый участок водоносного горизонта [1, 3—6].

Зачастую требуется обеспечить практически полный перехват подземных вод. Например, для хранилища жидких радиоактивных отходов горно-химического комбината, образованного в результате закачки промышленных отходов этого комбината в пористые песчано-глинистые породы [6].

В качестве дренажных водозаборных сооружений для данных целей широкое применение получили батареи скважин, поскольку технология сооружения водозаборных скважин достаточно совершенна, а теория линейных вертикальных дренажей разрабатывалась многими исследователями: С.К. Абрамовым, В.С. Аверьяновым, М.Е. Альтовским, Н.Н. Биндерманом, Ю.П. Борисовым, Ф.М. Бочевым, Н.Н. Веригиным, Н.К. Гириным, А.В. Романовым, В.М. Шестаковым, И.А. Чарным, М. Маскетом, С.М. Нумеровым, Ф. Форгеймером и др.

Тем не менее в настоящее время развитие подземных гидроструйных технологий позволяет в качестве вертикальных дренажей применить не только взаимодействующие и отделённые одна от другой скважины, но и сплошные щелевые выработки. При этом речь идёт не о сооружении барражей, являющихся водонепроницаемыми устройствами — экранами. Эффективный перехват продвижения загрязнений обеспечивается откачкой загрязнённых вод через скважины, соединённые между собой в интервале проницаемого водоносного пласта щелевыми выработками, заполненными материалами с высокой проницаемостью.

Сооружение сплошных щелевых выработок осуществимо с применением скважинной гидроструйной технологии.

Для этого в эксплуатируемую или вновь сооружаемую скважину опускается гидроструйный агрегат (СГА) и с его помощью проходит щелевая выработка. Проходка осуществляется гидроразрывом свободными незатопленными струями в осушенном очистном пространстве. Это способствует сохранению заданной формы и устойчивости выработки на период её формирования и последующей закладки. Выдача пульпы на поверхность осуществляется гидроэлеваторным подъёмом.

Сооружение щелевых выработок ведут в открытом забое. Как правило, конструкция эксплуатационной скважины предусматривает её обсадку до водоносного, рабочего, горизонта. При сооружении новых скважин, непосредственно после их обсадки, СГА опускается на забой скважин и производится формирование щелевых выработок в интервале от подошвы до кровли рабочего горизонта.

После закладки выработанного пространства (эту операцию предусматривает конструкция СГА) СГА извлекают из скважины, а в обработанный интервал монтируют фильтр заданной конструкции.

Когда работы осуществляют в эксплуатируемых скважинах, первоначально извлекают фильтр (например, при конструкции «впотай»). Если это невозможно, то фильтр режут гидромониторной струей с использованием пескоструйного эффекта, при этом процессы резки фильтра и формирования щелевых выработок происходят одновременно.

Внешний диаметр става СГА может варьировать в интервале типоразмеров 89—273 мм. Меньшие значения характерны для эксплуатируемых скважин; большие — для вновь сооружаемых.

При меньших типоразмерах СГА поверхностный комплекс для сооружения щелевых выработок с использованием технических средств скважинной гидротехнологии является автономным и мобильным. Основными видами оборудования в этом случае являются самоходная буровая установка, цементировочный агрегат для закладки полостей и передвижная ёмкость на размыв.

При масштабных работах на вновь сооружаемых скважинах поверхностный комплекс включает в себя естественный или искусственный земляной водоём; при этом цикл водоснабжения является замкнутым. Для этого варианта целесообразно применение больших типоразмеров СГА.

Качественная картина предлагаемого метода характеризуется числом сооружаемых щелевых выработок и их геометрическими параметрами. Математическое описание данного процесса возможно с использованием следующих зависимостей [7].

Дебит скважины:

$$Q = 2,73 \frac{kms}{\lg R \lg R_{np}}, \text{ м/сут}, \quad (1)$$

где  $R_{np}$  — приведенный радиус, м:

$$R_{np} = \sqrt{\frac{nlb}{\pi}}, \text{ м}, \quad (1, a)$$

$n$  — число щелевых выработок длиной  $l$  и шириной  $b$ .

Радиус влияния  $R$ :

$$R = 10S\sqrt{k}, \text{ м}, \quad (1, б)$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации, м/сут,  $m$  — мощность водоносного горизонта (высота рабочего интервала), м,  $S$  — понижение, м.

Параметр  $l$  — энергетический показатель конструкции СГА в зависимости от физико-механических свойств окружающей среды.

$$l = \frac{P_m}{P_{кр}}^{1,18} l_n, \quad (1, в)$$

где  $P_m$  — давление на насадке гидромонитора, МПа,  $P_{кр}$  — параметр разрушаемости, МПа,  $l_n$  — длина начального участка струи, м.

Ширина полости, рассматриваемая как функция длительности совершения технологических операций одного цикла (размыв + закладка), имеет вид:

$$b_t = \frac{3}{4} \frac{l_t}{\sigma_{сж\_t} H_t}, \text{ м}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{сж\_t}$  — длительная прочность на одноосное сжатие горной породы, МПа,  $H_t$  — текущая вертикальная координата размыва, м,  $l_t$  — текущая координата критической длины размыва, м,  $\gamma$  — удельный вес горной породы, МН/м<sup>3</sup>.

Необходимое число щелевых выработок одной скважины находится в пределах 2—8 и первоначально определяется по результатам предварительных исследований. Пространственная ориентация при минимальных количественных значениях определяется перпендикулярно движению основного потока, а общее число зависит от степени закольматированности прифильтровой зоны скважины или условия задания увеличения зоны её влияния.

Именно при правильных расчёте параметров  $n$ ,  $l$ ,  $b$  и учёте их взаимозависимости создаются наиболее благоприятные условия функционирования предлагаемой технологической схемы.

Однако с учётом высокой трудоёмкости сооружения дренажей описанной конструкции возникает вопрос об условиях, при которых увеличение числа (частоты) скважин на фиксированной длине линейного дренажа является эквивалентным (по показателю эффективности водопонижения) замене батареи скважин сплошным щелевым дренажом (щелевой выработкой).

Методология рекомендуемых к применению расчётов вертикальных скважинных дренажей предусматривает использование формул с разнообразными параметрами, учитывающими конкретные условия эксплуатации скважин [1, 3, 4]. Расчёты большей частью преследуют цель определения времени осушения рассматриваемой площади. Формулы содержат константы, характеризующие: режимы движения, граничные условия питания и естественного дренажа подземных вод, размещение скважин на дренируемых площадях, проектируемые понижения динамического уровня, дебиты скважин в отдельности и водозабора в целом, характер формирования депрессионной воронки во времени, коэффициенты фильтрации пород, мощность водоносного пласта, несовершенство скважин и т. д. Большой инвариантностью относительно конкретных технологических параметров обладают формулы Форхгеймера [1]. Применение принципа суперпозиции, основанное на сложении

водопонижений, рассчитанных от действия каждой скважины при работе её без учёта взаимодействия, позволяет получить модификации формул Форхгеймера для произвольного числа произвольным образом расположенных взаимодействующих скважин в различных условиях откачки и в различных типах водоносных горизонтов.

С учётом поставленной задачи по изучению влияния числа скважин в линейном дренаже на эффективность водопонижения, была предпринята попытка минимизации количества входных расчётных параметров. В этой связи нами был применён метод фильтрационных сопротивлений, позволяющий характеризовать эффективность дренажа через отношение затрат энергии на преодоление дренажа к количеству жидкости прошедшей через него [2—4]. Известно, что в гидравлике затраты энергии определяются через перепад напоров — энергию, которую затрачивает единица веса жидкости при своем движении на рассматриваемом участке. Метод фильтрационных сопротивлений рассматривает течение флюидов в пористой среде с определенным гидродинамическим сопротивлением, как аналогичное течению электрического тока, применяя при этом известные законы электротехники. Для зон на некотором удалении от скважин подобный метод позволяет непосредственно устанавливать связь дебитов  $Q$  и понижений в пласте  $S$ , обобщённо характеризуя ёмкостно-фильтрационные характеристики пласта.

Эффективность дренажа удобно оценивать, используя отвлеченный безразмерный параметр «фильтрационное сопротивление» —  $R_c$ . Одновременно моделирование скважин «стоками и источниками» упростило проведение дальнейших расчётов и позволило применить метод наложения течений. В условиях вышеуказанных методов: гидравлических сопротивлений, стоков и источников, формулы для расчёта скважины с постоянным дебитом (что соответствует скважинам с насосами с постоянной производительностью) представляются в виде [3]:

$$\frac{S}{R_c} = \frac{Q}{4 \frac{km}{r^2} Ei\left(\frac{r^2}{4at}\right)}, \quad (3)$$

где  $S$  — понижение уровня ( $H_c$  и  $H$  — первоначальный и текущий уровни),  $Q$  — дебит скважины,  $km$  — проводимость пласта ( $k$  — коэффициент фильтрации;  $m$  — мощность),  $a$  — коэффициент пьезопроводности,  $r$  — координата,  $t$  — время.

Применительно к определению понижения уровня в самой скважине:

$$0 = \frac{r_{сKB}^2}{4at}. \quad (3, a)$$

Для группы произвольно расположенных взаимодействующих скважин на основе метода наложения фильтрационных течений расчётные зависимости применяются в виде:

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4 km} R_{ci}, \quad (4)$$

где  $S$  — суммарное понижение уровня в данной точке под влиянием всех взаимодействующих скважин,  $Q_i$  — расход  $i$ -й скважины,  $R_{ci}$  — гидравлическое сопротивление, вызванное откачкой из  $i$ -й скважины ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , здесь  $n$  — общее число скважин).

Если суммарное понижение уровня определяется непосредственно в скважине, формула (4) трансформируется:

$$S = S_0 + \sum_{i=1}^{n(0)} S_{i(0)} = \frac{Q_0}{4 km} R_{c0} + \sum_{i=1}^{n(0)} \frac{Q_i}{4 km} R_{ci(0)}. \quad (5)$$

В правой части уравнения (5) первым членом выражена величина понижения уровня  $S_0$ , пропорциональная сопротивлению  $R_{c0}$  скважины, в которой определяется общее понижение уровня  $S$ . Вторым член характеризует влияние остальных скважин, выражаемое суммой понижений или «срезок» уровня  $S_i$  и соответствующих сопротивлений  $R_{ci}$ . Индекс  $(-0)$  означает, что данная скважина с расходом  $Q_0$  из суммы исключается.

На рис. 1 представлены результаты проведённых нами расчётов фильтрационных сопротивлений на пространстве перед линейным рядом дренажных скважин. Расстояние между скважинами в представленном варианте расчета составляло 100 м, при этом фильтрационные сопротивления просчитывались еще на 200 м за пределы ряда скважин (значение + 600, + 700, - 600, - 700).

Результаты расчётов при различных расстояниях между скважинами свидетельствуют о целесообразности применения параметра обобщенных фильтрационных сопротивлений для сравнения возможностей дренажных систем без привлечения конкретных значений расходов  $Q$  и понижений  $S$ .

Далее исследовался вопрос о том, каким образом увеличение числа скважин при фиксированной длине ряда (учащение ряда) влияет на величины гидравлического сопротивления в линии самого ряда. Рассматривались характерные точки: центральная скважина ряда и крайние скважины ряда — определялись сопротивления непосредственно в этих скважинах при увеличении числа скважин в ряду.

При определении сопротивлений в центральной скважине, для контроля расчёты были проведены по двум методикам: по первой — с применением формулы (5), по второй применялась формула вида [4, с. 75]:

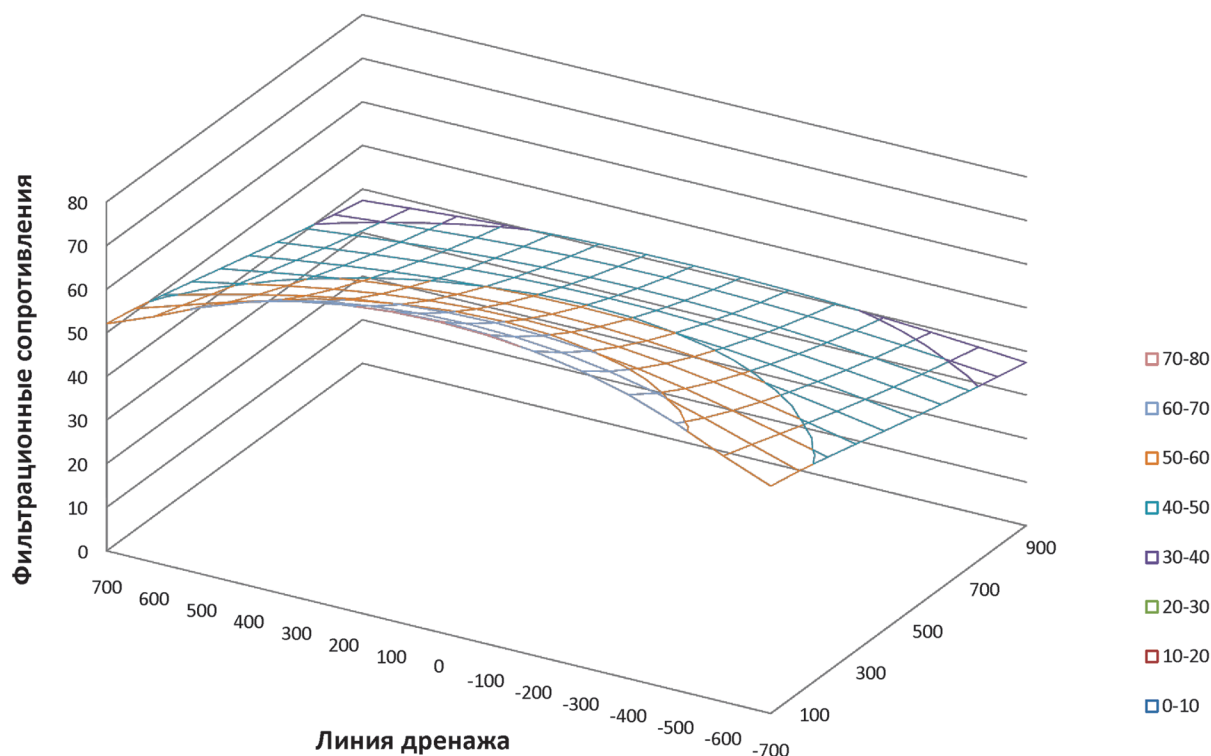


Рис. 1. Распределение показателя обобщенных фильтрационных сопротивлений перед линейным рядом дренажных скважин

$$R = 2F(B, n) Ei \left( B \frac{r_0}{l} \right)^2, \quad (6)$$

$$F(B, n) = \frac{1}{B} \frac{l^2}{4at} Ei(Bk^2),$$

Применение формулы (6), являющейся трансформацией формулы (5) с целью стандартизации расчётов, позволяло осуществить контроль правильности расчётов на первоначальном этапе по значениям функции  $F(B, n)$ , приведённым в стандартных таблицах. При проведении расчётов принималось, что коэффициент пьезопроводности меняется —  $a = 10^2 - 10^7 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

Результаты расчётов изменений сопротивления  $R$  в центральной скважине ряда общей длиной 500 м с увеличением плотности скважин с применением формулы (5) представлены рис. 2, 3. На

графиках число скважин варьирует от 1 до 50. Это то их число в одном крыле, которые удваивает эффект от взаимодействия скважин, и это учтено в расчетной формуле. Аналогичные замечания справедливы для расчётов по формуле (6), результаты которых полностью идентичны рис. 2, 3.

Результаты расчётов изменений сопротивления  $R$  для крайней скважины ряда общей длиной 500 м с увеличением частоты скважин с применением формулы (5) представлены рис. 4, 5. Для упрощения сравнения с результатами расчётов, представленным на рис. 2, 3, здесь показаны расчёты не для всего ряда скважин длиной 500 м, а только для одной из половин ряда. Безусловно, что влияние другой половины ряда скважин в расчётах было учтено.

В заключение следует заметить, что кроме показателя эффективности дренажа необходимо учитывать и стоимостные показатели. Расчёты показыва-

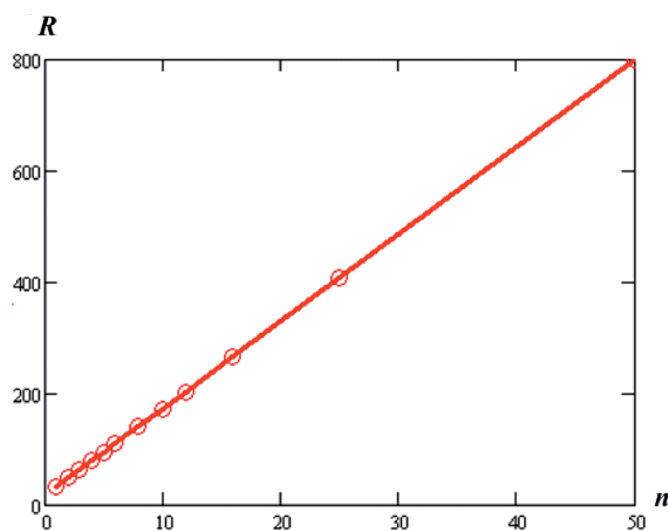


Рис. 2. Рост сопротивления  $R$  центральной скважины с увеличением числа скважин  $n$  (по формуле 4) в крыле длиной 250 м от центральной скважины

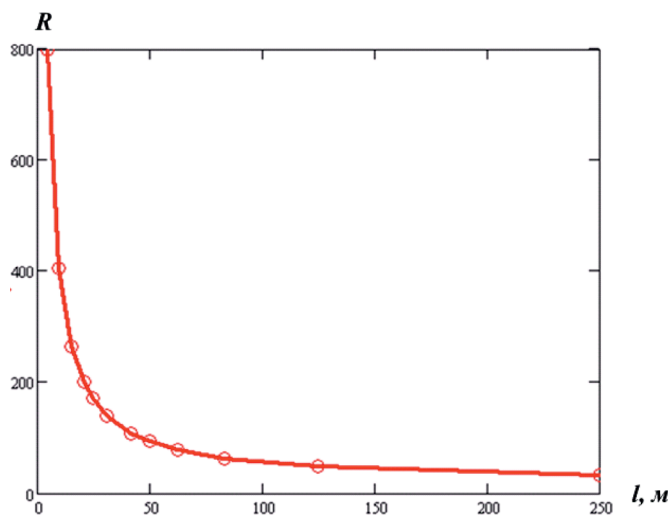


Рис. 3. Изменения сопротивления  $R$  центральной скважины в соответствии с изменениями расстояния между скважинами, в крыле длиной 250 м, от центральной скважины

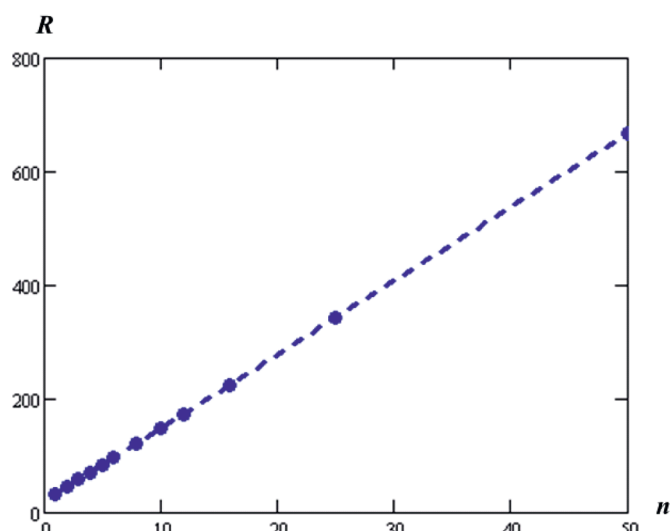


Рис. 4. Рост сопротивления  $R$  крайней скважины ряда с увеличением числа скважин  $n$

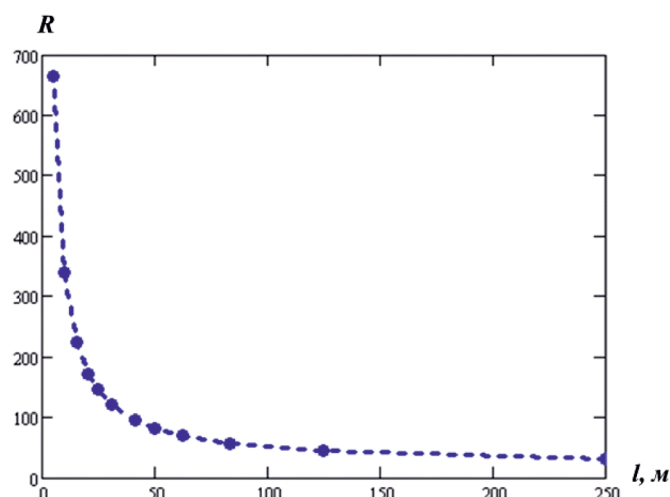


Рис. 5. Изменения сопротивления  $R$  крайней скважины в соответствии с изменениями расстояния между скважинами

ют, что сооружение сплошных щелевых выработок с помощью предлагаемой технологии уменьшает суммарные затраты на водопонижение в 1,5–2 раза, начиная с глубины более 50 м, при этом с увеличением глубины (от 50 до 100–150 м) затраты имеют тенденцию к уменьшению.

### Выводы

1. Расчёты свидетельствуют, что сопротивления скважин линейного дренажа с учетом взаимовлияния скважин увеличивается прямо пропорционально увеличению числа скважин на этом дренаже (при неизменной длине дренажа)

2. Заметный рост гидравлического сопротивления  $R$  скважин в результате увеличения их числа

(плотности) в линейном дренаже имеет место при сближении скважин до расстояний порядка 30 м между ними, а существенный рост — при сближении скважин на расстояние менее 10 м.

3. На основании первых двух пунктов можно сделать вывод о том, что при необходимости создания больших гидравлических сопротивлений на пути фильтрационных потоков на глубине, в проницаемых подземных пластах, целесообразно заменять вертикальные скважинные дренажи сплошными щелевыми выработками, что требует применения специальных технологий.

4. Использование гидроскважинных методов проходки щелевых коллекторов обеспечивает не только гидравлические преимущества, но и снижает суммарную стоимость сооружения и эксплуатации дренажей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов С.К. Подземные дренажи в промышленном и городском строительстве. М.: Стройиздат, 1973. 280 с.
2. Борисов Ю.П., Пилатовский В.П., Табаков В.П. Разработка нефтяных месторождений горизонтальными и многозабойными скважинами. М.: Недра, 1964. 154 с.
3. Бочеввер Ф.М. Теория и практические методы расчета эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968. 325 с.
4. Бочеввер Ф.М., Веригин Н.Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М.: Гостроиздат, 1961. 198 с.
5. Брюховецкий О.С., Ганин И.П. Разработка методологии и структуры построения базы данных по методам ликвидации локальных техногенных загрязнений в массивах горных пород // Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники (подпрограмма «Экология и рациональное природопользование») // Записки Санкт-Петербургского горного института, СПб., 2003. Т. 154, С. 237–239.
6. Рыбальченко А.И., Пименов М.К., Костин П.П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. 257 с.
7. Найденко И.Ю. Механические методы сооружения противифльтрационных завес // XI Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле», Москва, Российский государственный геологоразведочный университет, 09–12 апреля, 2013 г. Доклады в 3 т. Т. 2. М.: ООО Издательство «Ваш полиграфический партнер», 2013. С. 191–192.

УДК 550.85

## ОПТИМАЛЬНОЕ ЧИСЛО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ МЕТОДИКИ ШЛАМОВОГО ОПРОБОВАНИЯ ПРИ ОТКРЫТОЙ ДОБЫЧЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

*Е.Б. ЯНИЦКИЙ, В.А. ДУНАЕВ*

ОАО «ВНОГЕМ»

308007, г. Белгород, пр. Б. Хмельницкого, 86; e-mail: yanez@geomix.ru

По итогам авторских экспериментальных работ на Ковдорском апатит-штаффелитовом месторождении с учётом результатов аналогичных работ, выполненных другими исследователями на рудных месторождениях различных генетических и промышленных типов, установлено, что для обоснования методики опробования шлама буровзрывных скважин при открытой разработке любого рудного месторождения достаточно пяти экспериментальных скважин по каждому типу шлейфа шлама (конусовидному или вытянутому по линии буровой станок — устье скважины).

Ключевые слова: рудные месторождения; карьер; шлейф шлама; опробование; обоснование методики; число экспериментальных скважин.