

С.В. ЯНКО, д-р техн. наук, Академик АГН, Академия Горных Наук Украины, Киев

Б.А. ТРОШЕНЬКИН, д-р техн. наук, ИПМаш НАНУ, Харьков

Н.Н. ЗИПУННИКОВ, канд. техн. наук, ИПМаш НАНУ, Харьков

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ГРАНУЛИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

В данной статье исследован процесс фильтрации воды через слой песка, порошка ферросиликоалюминия и гранулированного шлака. В лабораторных условиях изучен характер изменения скорости фильтрации в зависимости от гидравлического градиента. Установлено влияние степени уплотнения материала на интенсивность фильтрации.

Ключевые слова: фильтрация, шлак, глина, уголь, грунт, гидравлический градиент.

Введение. Поиск альтернативных энергоносителей является одной из важнейших задач современности. Основное внимание исследователей по-прежнему приковано к возможности получения энергетических газов на основе угля. Известно, что при подземной выемке угля извлекается лишь 40–50 % запасов месторождения. Остальная часть остается под землей в виде поддерживающих целиков. Предложен способ управляемого сжигания целиков с вытяжкой на поверхность горячих продуктов горения с целью выработки электроэнергии и тепла. Повышение коэффициента извлечения полезного ископаемого из недр за счет сжигания не менее, чем на 10–15 % увеличивает эффективность горно-энергетического предприятия [1].

Для обеспечения надежной эксплуатации подземного генератора тепла (ПГТ) необходимо вблизи ПГТ пробурить ряд водопонижающих скважин. Интенсивность притока подземных вод в зону ПГТ зависит как от параметров процесса сжигания угля, так и от фильтрационных свойств углевмещающих пород. Подземные водопроницаемые коллекторы рассматривают на основе

© С.В. Янко, Б.А. Трошенькин, Н.Н. Зипунников. 2013

представлений о дисперсном состоянии пористых тел. Особенности этой структуры – размеры и форма пор, способ их сообщения друг с другом – регулируют распределение воды в поровом пространстве и ход массообменных процессов.

Постановка задачи. Поскольку в ходе выжигания угольных пластов условия поступления воды в ПГТ существенно изменяются, то и производительность водопонижающих скважин целесообразно рассчитывать для нескольких режимов работы ПГТ.

В начальных холодных условиях течение воды происходит под действием перепада давления Δp . В этом случае градиенты других массовых сил незначительны и ими можно пренебречь.

Тогда ламинарная фильтрация воды должна подчиняться закону Дарси [2]

$$v = \frac{k}{\mu} \Delta p, \quad (1)$$

где v – скорость фильтрации воды;

k – коэффициент проницаемости грунта;

μ – вязкость воды.

Как следует из формулы (1), скорость фильтрации прямо пропорциональна располагаемому напору и обратно пропорциональна вязкости воды. Величина коэффициента проницаемости грунта зависит только от свойств грунта, т. е. от размеров пор в образце породы и особенностей геометрии порового пространства.

Поскольку температура окружающей среды перед началом процесса сжигания угля практически не меняется, то для данного случая фильтрацию воды в холодный ПГТ можно проводить по зависимости

$$v_{\phi} = k_{\phi} \Delta p, \quad (2)$$

где v_{ϕ} – расход воды в единицу времени через единицу площади поперечного сечения водопроницаемого коллектора, м/с;

$k_{\phi} = \frac{k}{\mu}$ – коэффициент фильтрации имеет размерность скорости и

соответствует скорости течения воды в микропорах грунта при градиенте напора равном единице, м/с;

Δp – гидравлический градиент.

В свою очередь, гидравлический градиент можно рассчитать

$$\Delta p = \frac{H_1 - H_2}{L}, \quad (3)$$

где $(H_1 - H_2)$ – потери напора по длине изучаемого участка водопроницаемого коллектора, м; H_1 – высота столба воды в начале изучаемого участка водопроницаемого коллектора, м; H_2 – высота столба воды в конце изучаемого участка коллектора, м; L – длина изучаемого участка коллектора, м.

В общем случае коллектор может располагаться в породах как в наклонном, так и в вертикальном положениях.

Для изучения фильтрационной способности различных дисперсных материалов смонтирован экспериментальный стенд (рис. 1).

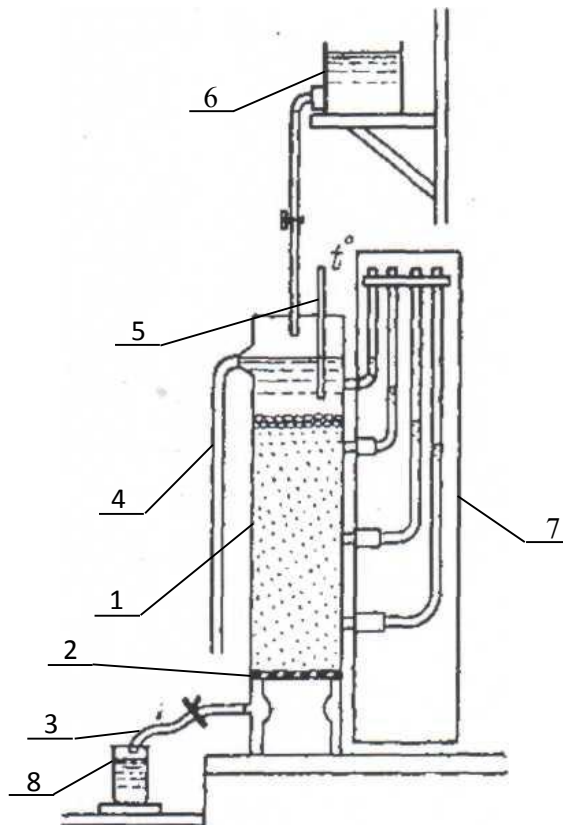


Рис. 1. Вертикальный фильтрационный стенд

Стенд включает следующие основные элементы: 1 – рабочую

камеру цилиндрической формы; 2 – неподвижную опорную решетку, расположенную в нижней части рабочей камеры; 3 – патрубок для выпуска профильтровавшейся через грунт воды (при нисходящей фильтрации); 4 – переливной канал; 5 – термометр; 6 – приспособление для поддержания на постоянной отметке уровня вытекающей из прибора воды; 7 – трубчатые пьезометры; 8 – мерная емкость.

Рабочая камера фильтрационного стенда выполнена в виде цилиндра высотой 1,35 м и диаметром 0,1 м. По высоте рабочей камеры через равные промежутки подсоединено четыре стеклянных пьезометра, позволяющие последовательно фиксировать перепады давления воды на отдельных участках фильтрационного канала.

Численные результаты и их обсуждение. В качестве исследуемых материалов использовался песок с диаметром частиц $d = (0,63 - 0,5) \cdot 10^{-3}$ м; смесь глины (15 %) и песка (85 %), диаметр частиц песка $d = (1 - 0,5) \cdot 10^{-3}$ м, глины $d < 5 \cdot 10^{-6}$ м; сплав ферросиликоалюминия (ФСА состава: Al – 16,9 %; Fe – 7,3 %; Si – остальное) диаметр частиц сплава $d = (1 - 0,63) \cdot 10^{-3}$ м и шлак $d = (1,5 - 0,5) \cdot 10^{-3}$ м.

При выборе перечисленных материалов учитывался ряд природных и техногенных факторов. В частности, подземные водопроницаемые коллекторы, как правило, состоят из песчаных слоев. Поэтому выбор первого образца вполне обоснован.

Состав второго образца в основном соответствует составу углесодержащих пород Богдановского месторождения углей, где предполагается разместить опытный образец подземного генератора тепла.

Во время сжигания угля внутри ПГТ образуется значительное количество шлаков. При охлаждении шлаки растрескиваются, обвалы в выжигаемом канале способствуют их измельчению.

При высоких температурах в зоне сжигания оксиды неорганической части угля восстанавливаются до сплава ФСА.

Перечисленные обстоятельства послужили основанием для включения в число испытываемых материалов сплава ФСА и шлака.

В таблице и рисунках 2–4 показаны экспериментально найденные зависимости скорости фильтрации (v_f) от гидравлического градиента (Δp) для песка, ФСА и шлака.

Таблица. Опытные данные фильтрации воды через слой песка, ФСА и шлака

Напор, $H=H_1-H_2$, м	Высота фильтр. слоя, L , м	Гидравлический градиент, Δp	Коэффициент фильтрации, k_f , м/с	Скорость фильтрации, v_f , м/с	Время, с
ПЕСОК					
0,162	1	0,162	$1,59 \cdot 10^{-1}$	$2,59 \cdot 10^{-2}$	1800
0,173	1	0,173	$1,72 \cdot 10^{-1}$	$2,46 \cdot 10^{-2}$	3600
0,18	1	0,18	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$2,39 \cdot 10^{-2}$	3600
0,195	1	0,195	$1,55 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	3600
ФСА					
0,0855	0,6	0,142	$2,24 \cdot 10^{-1}$	$3,19 \cdot 10^{-2}$	1800
0,161	0,6	0,268	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$3,12 \cdot 10^{-2}$	3600
0,17	0,6	0,283	$1,095 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	3600
0,172	0,6	0,286	$1,069 \cdot 10^{-1}$	$3,06 \cdot 10^{-2}$	3600
ШЛАК					
0,188	0,5	0,376	$0,82 \cdot 10^{-1}$	$3,09 \cdot 10^{-2}$	1800
0,197	0,5	0,394	$0,77 \cdot 10^{-1}$	$3,07 \cdot 10^{-2}$	3600
0,2	0,5	0,4	$0,76 \cdot 10^{-1}$	$3,06 \cdot 10^{-2}$	3600
0,22	0,5	0,44	$0,68 \cdot 10^{-1}$	$3,03 \cdot 10^{-2}$	3600

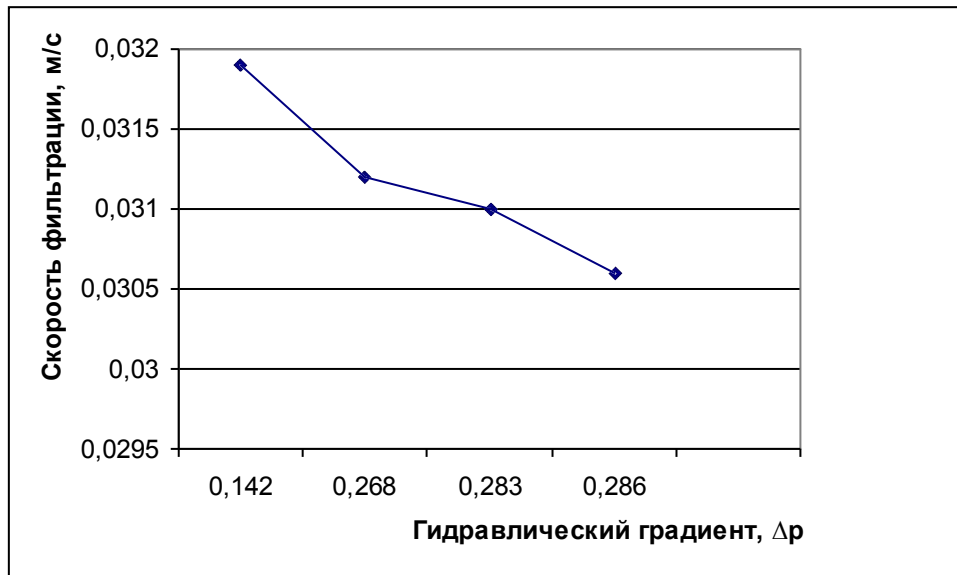


Рис. 2. Зависимость скорости фильтрации ФСА от градиента напора



Рис. 3. Зависимость скорости фильтрации песка от градиента напора

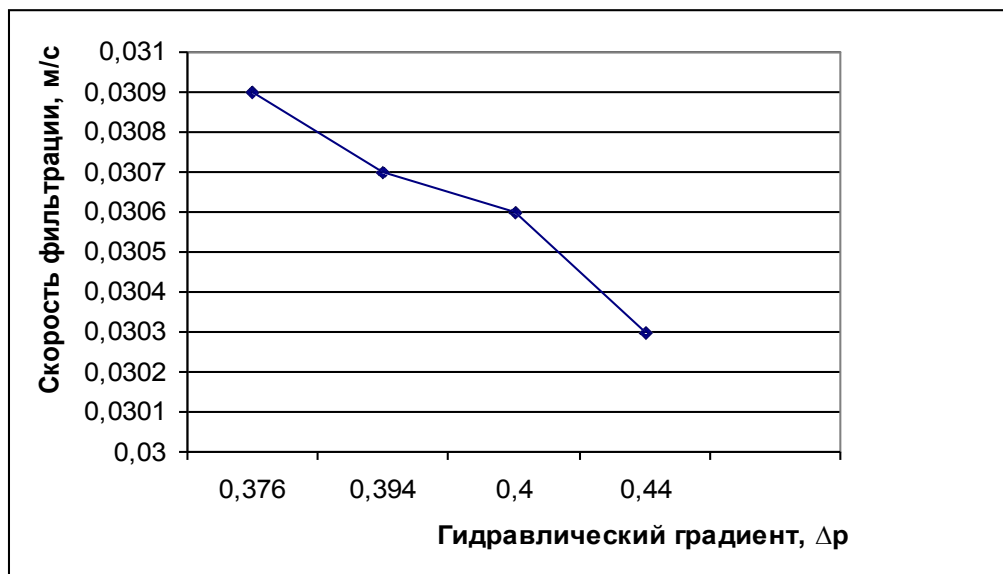


Рис. 4. Зависимость скорости фильтрации шлака от градиента напора

При течении воды через исследуемые материалы средняя скорость фильтрации и коэффициенты фильтрации составили:

1. ФСА: $v_{\phi} = 3,11 \cdot 10^{-2}$ м/с; $k_{\phi} = 1,39 \cdot 10^{-1}$ м/с;
2. Песок: $v_{\phi} = 2,38 \cdot 10^{-2}$ м/с; $k_{\phi} = 1,52 \cdot 10^{-1}$ м/с; 3. Шлак: $v_{\phi} = 3,062 \cdot 10^{-2}$ м/с; $k_{\phi} = 0,75 \cdot 10^{-1}$ м/с.

В начальный период происходит незначительная усадка рассматриваемых материалов и насыщение их влагой. Для этих условий скорость и коэффициент фильтрации принимают значения:

1. ФСА: $v_{\phi} = 3,102 \cdot 10^{-2}$ м/с; $k_{\phi} = 1,23 \cdot 10^{-1}$ м/с;
2. Песок: $v_{\phi} = 2,47 \cdot 10^{-2}$ см/с; $k_{\phi} = 1,14 \cdot 10^{-1}$ м/с.

На основании полученных опытных данных установлено, что исследуемые материалы входят в группу супесей [3]. Коэффициенты фильтрации исследуемого шлака, полученные в лабораторных условиях, приближенно соответствуют известным данным для шлаковых отложений. Коэффициент фильтрации для этих же материалов, но уложенных с оптимальной плотностью и имеющих наибольшую влажность, в среднем на один порядок меньше указанных значений.

Опыты проведенные с глинистыми породами подтвердили, что фильтрация воды в этом случае имеет свои особенности, вызванные малыми размерами пор и вязким сопротивлением водо-коллоидных пленок, обволакивающих минеральные частицы грунтов. Чем тоньше водо-коллоидные пленки, тем большее сопротивление они оказывают напорному движению воды как вследствие большой вязкости пленок, так и их упругости.

Возникающие напоры при незначительной водопроницаемости этих грунтов гасаются на весьма малом расстоянии и разжижения не происходит. Поэтому при фильтрации воды через образец смеси глины (15 %) с песком (85 %) после насыщения водой создавалось значительное сопротивление напорю жидкости, что явилось препятствием дальнейшему водонасыщению. Практически этот образец оказался водонепроницаемым.

При сжатии грунтов сплошной постоянной нагрузкой хорошо уплотняются лишь маловлажные рыхлые песчаные и неводонасыщенные грунты. Эти среды имеют жесткие контакты между минеральными частицами, которые при таких воздействиях легко нарушаются, что и обуславливает перегруппировку частиц и более плотную их упаковку. В водонасыщенных же песках динамические нагрузки вызывают значительные напоры воды, грунт взвешивается в некоторой области и при определенных условиях разжижается, растекаясь в свободном пространстве.

Выводы. Экспериментальные данные по исследованию фильтрации воды через слои песка, шлака и сплава ферросиликоалюминия, образующегося в ПГТ, показали, что

перечисленные материалы по своим фильтрующим свойствам относятся к супесям. Скорость фильтрации воды через эти материалы находится в пределах $2,38 \cdot 10^{-2} - 3,11 \cdot 10^{-2}$ м/с, коэффициент фильтрации $0,75 \cdot 10^{-1} - 1,52 \cdot 10^{-1}$ м/с.

Полученные экспериментальные данные позволяют выполнить приближенный расчет производительности водопонижающих скважин. Однако выбранный способ оценки скорости фильтрации недостаточно надежен, поскольку он не может дать характеристики всей области, где предполагается разместить ПГТ. Поэтому в дальнейшем необходимо прибегнуть к полевым способам определения коэффициентов фильтрации, которые дают наиболее достоверные значения этой величины.

Список литературы: 1. Трошенькин Б.А. Закономерности взаимодействия подземного генератора тепла с окружающей средой / Б.А. Трошенькин, В.Б. Трошенькин, С.В. Янко // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика // Збірник наукових праць. – Дніпропетровськ: ЛІРА ЛТД, 2013. – № 5. – С. 5-14. 2. Романков П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П.Г. Романков, М.И. Курочкина. – Л.: Химия, 1982. – 288 с. 3. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.

Поступила в редколлегию 11.09.13

УДК 622.278:622.746; 622.7.002.82

Результаты исследования процесса фильтрации воды через слой гранулированного материала / Янко С.В., Трошенькин Б.А., Зипунников Н.Н. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х.: НТУ «ХП» – 2013. – № 55 (1028). – С. 3–10. Бібліогр.: 3 назв.

В даній статті досліджено процес фільтрації води через шар піску, порошку феросилікоалюмінію та гранульованого шлаку. В лабораторних умовах вивчено характер зміни швидкості фільтрації в залежності від гідравлічного градієнту. Встановлено вплив ступеня ущільнення матеріалу на інтенсивність фільтрації.

Ключові слова: фільтрація, шлак, глина, вугілля, ґрунт, гідравлічний градієнт.

In this article the process of water filtration through a layer of sand, powder of ferro-silic-alyuminium alloy and grained slag are researched. In the laboratory conditions the character of changes of the filtration rate against of hydraulic gradient are studied. The influence of the degree of compaction of the material on the intensity of the filtration are established.

Key words: filtration, slag, clay, coal, soil, hydraulic gradient.