

УДК 622.277

**И.И. Вашлаев, А.Г.Михайлов, М.Ю. Харитонова**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ  
ИНФИЛЬТРАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ  
БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ  
ОБЪЕКТОВ**

*Выполнены экспериментальные работы по определению основных параметров для предлагаемой технологии добычи благородных металлов при восходящем движении растворов в массиве хвостов обогащения.*

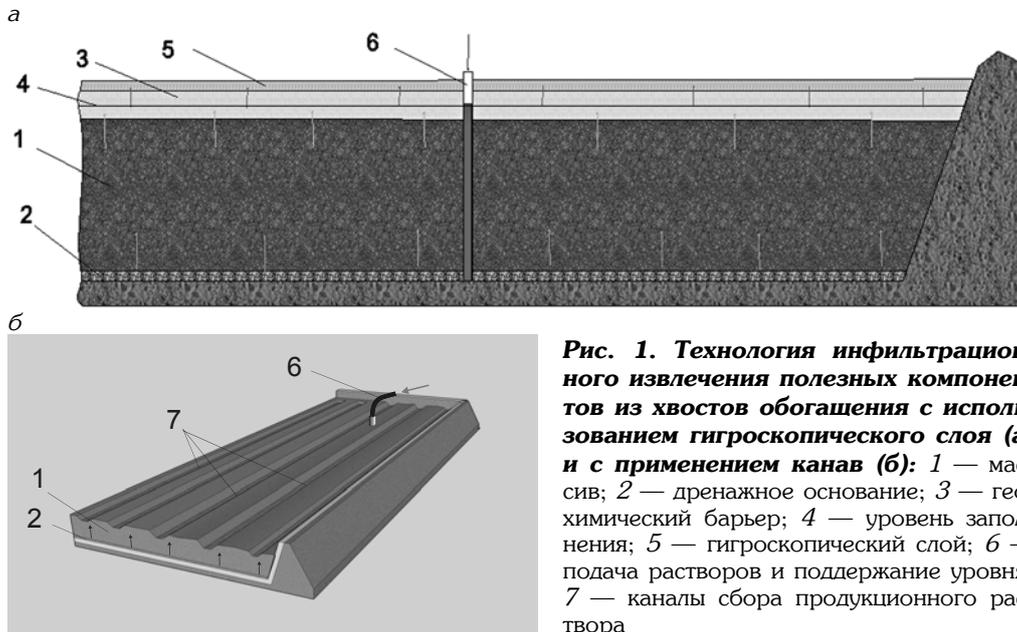
*Ключевые слова: добыча, инфильтрация, техногенный объект, моделирование параметров, благородные металлы.*

---

**В** России ресурсный потенциал техногенных объектов, содержащих благородные металлы, возможных к использованию для повторной отработки, весьма значителен: на долю прогнозных техногенных россыпей золота приходится более 50 % от всего добытого в России золота [1]. При переработке сульфидных медно-никелевых руд Норильского ГМК сформировано крупное по запасам (первые сотни тонн) техногенное месторождение благородных металлов. Уровень содержания суммы платиновых металлов и золота в отдельных разновидностях хвостов здесь достигает нескольких граммов (иногда десятков граммов) на тонну [1]. Только в Сибири наибольший интерес для повторной отработки представляют хвосты обогащения объединения Байзолото, Северо-Енисейского и Артемовского рудников, шламы Ачинского глиноземного комбината и др.

Техногенные объекты из хвостов обогащения являются специфическими образованиями, их особенностями являются вещественный состав, условия накопления и хранения, набор остаточных реагентов и влияние отдельных микроорганизмов

на сам техногенный объект. Повторная отработка техногенных объектов может производиться традиционным способом обогащения, кучным выщелачиванием. Особый интерес представляет разработка таких техногенных месторождений на базе новых физико-химических геотехнологий. В результате природного воздействия на массив техногенного объекта происходит естественное геодинамическое движение флюидов. Так как среда массива хвостохранилищ является агрессивной, то вследствие движения флюидов происходят сложные физико-химические превращения и некоторые элементы могут переходить в раствор, из которого в дальнейшем можно извлечь полезные компоненты. Наибольшую целесообразность для такого извлечения представляют благородные металлы, потому что в связи с их высокой ценностью эффективное промышленное извлечение возможно с небольшими содержаниями этих металлов в растворах. Можно задать внешнее управляющее воздействие на геофлюидные и физико-химические процессы в массиве с целью их активации и возможности разработки но-



**Рис. 1. Технология инфильтрационного извлечения полезных компонентов из хвостов обогащения с использованием гигроскопического слоя (а) и с применением канав (б): 1 — массив; 2 — дренажное основание; 3 — геохимический барьер; 4 — уровень заполнения; 5 — гигроскопический слой; 6 — подача растворов и поддержание уровня; 7 — каналы сбора продукционного раствора**

вых технологий извлечения полезных компонентов.

Для извлечения полезных компонентов из техногенных залежей предлагается два варианта инфильтрационной технологии [2]: с использованием гигроскопического слоя (рис. 1, а) и канав для сбора раствора (рис. 1, б). Суть первой технологии заключается в следующем: раствор по скважинам закачивается в массив хвостохранилища, поднимаясь вверх растворяет требуемые компоненты, проходит через геохимический барьер и по капиллярам накапливается в гигроскопическом материале. Продукционный раствор после отжатия направляется на переработку.

Вторая технология отличается от первой тем, что раствор собирается по канавам в зумпф и затем также направляется на переработку.

Наука о динамике флюидов в геологических средах является довольно непростой, Математическая структура связей может широко варьировать для

разных явлений. Но всегда эти величины должны отражать причинную обусловленность явления. Если подбирать отдельные геологические характеристики и их комбинации в соответствии с физическим подтекстом, то и на языке геологических характеристик можно дать описание, весьма близкое к причинно-следственному [3—6]. Не все еще представления о роли и механике воды в геологических процессах окончательно оформились, некоторые остаются неоднозначными. В научной литературе приводится множество методик и зависимостей на одни и те же явления и процессы, практика применения которых, дает иногда очень большой разброс значений. Поэтому вначале необходимо оценить и выбрать наиболее достоверные методы изучения.

С целью изучения закономерностей протекания геофлюидных процессов и их параметры и физико-химических превращений в материале хвостов обогащения была создан лабо-

### Емкостные параметры пород хвостохранилища

Наименование показателя	Значения показателя
Средневзвешенный диаметр зерен, мм	0,238
Эффективный диаметр частиц, мм	0,060
Гидравлический радиус, мкм	3,1
Проницаемость, дарси	0,456
Высота поднятия столба воды, м	0,498

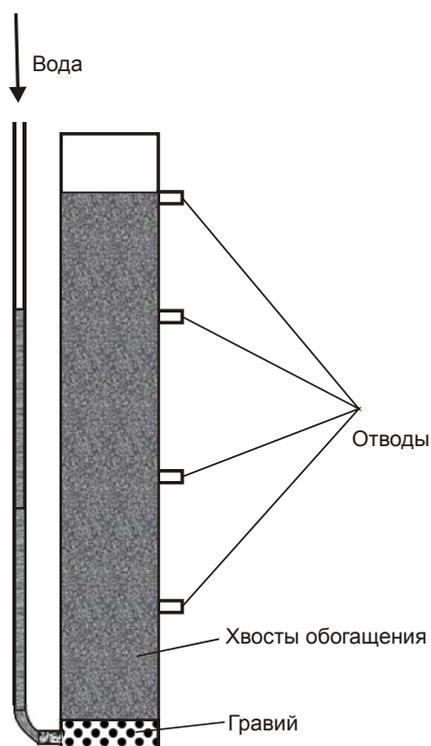


Рис. 2. Лабораторная установка

рационная установка (рис. 2). К отводам присоединены гибкие трубки, через которые можно отбирать пробы контактного раствора, профильтрованного через слой твердой фазы. В качестве объекта исследования использовался материал лежалых хвостов Норильского комбината. Высота слоя материала, который был помещен в цилиндрическую емкость, составила 86 см. В нижнюю часть колонны подается вода, высота столба воды регулируется.

Чтобы определить динамику движения подземных вод в техногенной залежи, необходимо знать емкостные параметры пород. К ним в частности относится эффективный диаметр частиц [4], слагающих реальную пористую среду, и определяемую по формуле

$$\frac{1}{d_s} = \sum_1^u \frac{g_i}{d_i}$$

где  $g_i$  — удельное содержание  $i$ -й фракции (в долях единицы от общего содержания);  $u$  — количество фракций;  $d_i$  — средний диаметр  $i$ -й фракции.

Распределение частиц по размерам для одного из отвалов лежалых пород приведено на рис. 1.

Способность породы пропускать флюиды характеризуется проницаемостью

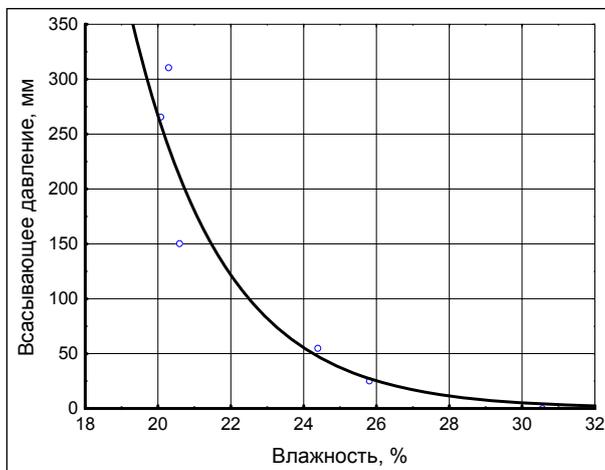
$$k = mR^2 / 8,$$

где  $m$  — пористость пород,  $m = 0,259-0,476$ ;  $R$  — гидравлический радиус пор (радиус трубок для модели идеального грунта), мкм;

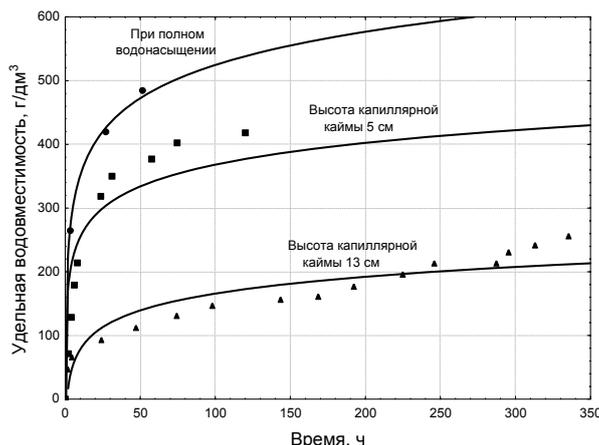
$$R = \frac{md_s}{12(1-m)}.$$

Выше уровня основного зеркала воды массиве находится водонасыщенный капиллярный слой. Высоту подъема флюида для капилляра можно определить по следующему выражению

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g r},$$



**Рис. 3. Изменение всасывающего давления от влажности породы**



**Рис. 4. Изменение удельной водовместимости гигроскопического материала для различного положения уровня грунтовых вод**

где  $\alpha$  — поверхностное натяжение, Дж/м<sup>2</sup>;  $\theta$  — краевой угол смачивания;  $\rho$  — плотность жидкости;  $r$  — радиус капилляра, м.

Выполненные расчеты фильтрационных параметров горных пород хвостохранилища (табл.) хорошо согласуются с данными, приведенными в различных литературных источниках.

Показателем свободной энергии грунтовой влаги является зависимость величины всасывающего давления ( $\psi$ ) от влажности породы. По данным экспериментальных наблюдений зависимость всасывающего давления ( $\psi$ ) от влажности может быть получена, если известно распределение влажности в капиллярной зоне при стационарном режиме и отсутствии инфильтрации. В капиллярной кайме при отсутствии питания или испарения всасывающее давление  $\psi$  равно высоте над свободной поверхностью воды. По натурным замерам получили зависимость  $W(Z_0)$ , где ( $Z_0$ ) — ордината данной точки относительно уровня грунтовых вод (гравитационной зоны). Зависимость всасывающего давления исследуемой породы от влажности ( $W$ ) в зоне капиллярной каймы описывается уравнением

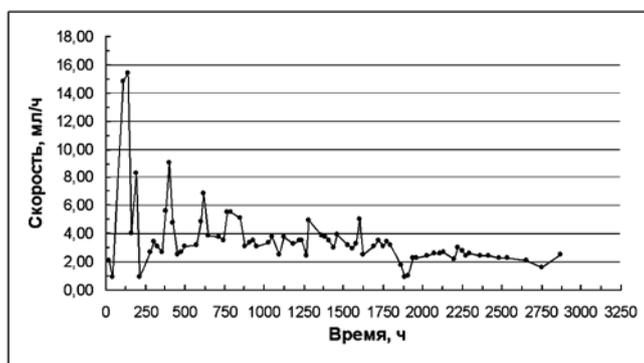
$$\psi = -6,88 \cdot 10^5 \exp(-0,3928W)$$

и приведено на рис. 3. Динамика изменения соответствует данным, приведенным Пашковским И. С. [8].

Влагоперенос при неполном водонасыщении можно определить также по основной гидрофизической характеристике породы, используя зависимость М. Ван Генухтена

$$\bar{\omega} = \left[ 1 + (\psi / h_k)^n \right]^{\left( \frac{1}{n} - 1 \right)}$$

где  $h_k$  — параметр, характеризующий высоту капиллярного подъема воды в породе;  $n$  — параметр,  $n = 1,1-1,9$  [5].



**Рис. 5. Динамика скорости прохождения раствора при давлении воды 35 мм**

Следует отметить, что выше были рассмотрены лишь простейшие структурные модели пористых сред, для которых наиболее просто вычислить фильтрационно-емкостные характеристики с помощью геометрических и гидравлических соотношений, не привлекая стохастических и иных методов.

Нами были проведены эксперименты по изучению влагопереноса с использованием сред с различными фильтрационными характеристиками: порода хвостохранилища и гигроскопичный материал, который располагался сверху. Первый режим соответствовал уровню грунтовых вод на границе между породой и гигроскопичным материалом. Второй — уровень грунтовых вод находится ниже границы на 5 см, третий — ниже на 13 см. Высота гигроскопического слоя составляет 25 мм.

Изучался параметр водовместимости гигроскопического материала с целью возможного использования его

в расчетах по геотехнологии добычи. Характер изменения удельной водовместимости от уровня грунтовых вод представлен на рис. 4.

С понижением уровня грунтовых вод высота удельная водовместимость снижается, а по мере насыщения гигроскопического материала влагой происходит снижение скорости влагонасыщения.

Предварительные расчеты показали, что в сутки с площади 1 га можно получать 102 т раствора (при уровне понижения 0 см), 51 т (при уровне понижения на 5 см), 23 т (при уровне понижения 13 см).

С целью изучения динамики скорости фильтрации проведены режимные испытания при превышении уровня подаваемой воды относительно поверхности материала хвостов обогащения 35 мм, результаты которых приведены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, скорость фильтрации с течением времени снижается: в начальный период ( $1/3 T$ ) она составляет 4,9 мл/ч, в последний период — 2,4 мл/ч. Снижение скорости с течением времени объясняется коагуляцией пор в массиве.

Таким образом, рассмотрены первоначально основные процессы инфильтрационной технологии, получены зависимости, которые требуют дальнейшего изучения и развития с целью практического применения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров В. А. Благородные металлы техногенных минеральных объектов Сибирского региона: Ресурсы и проблемы геолого-технологической оценки // Цветные металлы Сибири-2009: Сб. докл. первого ме-

ждународного конгресса. — Красноярск, 2009. — С. 37—45.

2. Вашлаев И. И., Харитонов М. Ю., Михайлов А. Г. Геотехнология добычи благородных металлов из техногенных

объектов // Цветные металлы Сибири–2009: Сб. докл. первого международного конгресса. — Красноярск, 2009. — С. 47—50.

3. Чепмен Р.Е. Геология и вода. Введение в механику флюидов для геологов: Пер. с англ. — Л.: Недра, 1983. — 159 с.

4. Басниев Л. С., Дмитриев Н. М., Розенберг Г. Д. Нефтегазовая динамика. — М.–Ижевск, 2005. — 544 с.

5. Шестаков В. М. Гидрогеодинамика. — М.: МГУ, 1995. — 368 с.

6. Мейнцер О. Э. Учение о подземных водах. — Л.–М.: Главная редакция геолого-разведочной и геодезической литературы, 1935. — 242 с.

7. Мироненко В. А. Динамика подземных вод: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1983. — 357 с.

8. Пашковский И. С. Методы инфильтрационного питания по расчетам влагопереноса в зоне аэрации. — М.: Московский университет, 1973. — 119 с. **ГИАБ**

#### **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

---

*Вашлаев Иван Иванович* — кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
e-mail: vash@ksc.krasn.ru,

*Михайлов Александр Геннадьевич* — доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
e-mail: mag@ksc.krasn.ru,

*Харитоновна Маргарита Юрьевна* — кандидат технических наук, научный сотрудник,  
e-mail: ritau@ksc.krasn.ru,

Институт химии и химической технологии СО РАН.



---

#### **РУКОПИСИ, ДЕПониРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»**

##### **СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОБДЕЛКИ МИКРОТОННЕЛЯ РАЗГРУЗОЧНОЙ ЩЕЛЬЮ ОТ ДАВЛЕНИЯ НАЗЕМНОГО СООРУЖЕНИЯ** (№906/07-12 от 25.04.12, 2 с.)

*Булах И.Н.* — магистр, e-mail: fistor@mail.ru, Московский государственный горный университет.

*Рассмотрена проблема, связанная с негативным влиянием наземного объекта на прокладываемый коллектор, а так же метод её устранения.*

*Ключевые слова:* микротоннель, разгрузка, коллектор, обделка, горное давление.

##### **WAY OF INCREASE OF STABILITY OF LINING OF THE MICROTUNNEL UNLOADING CRACK FROM PRESSURE OF THE LAND CONSTRUCTION**

*Bulah I.N.*

*In this article the problem, connected with negative influence of underground and land objects on a laid collector and a method of its elimination is considered.*

*Key words:* microtunnel, unloading, collector, lining and mountain pressure.