

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2024

№ 1

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 556.33:622.341.1

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАКАЧКИ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ЯКОВЛЕВСКОГО РУДНИКА В ГЛУБОКИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

Л. А. Еланцева, С. В. Фоменко

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
E-mail: Elantseva@bsu.edu.ru, SVFomenko@rambler.ru,
ул. Победы, 85, 308015, г. Белгород, Россия*

Для системы осушения Яковлевского рудника исследуется возможность закачки отбираемых дренажных вод в глубокие геологические структуры. Данная проблема обусловлена увеличением высоты зоны водопроводящих трещин и интенсификацией гидравлической связи между нижнекаменноугольным и руднокристаллическим водоносными горизонтами вследствие увеличения мощности выработанного пространства при выходе рудника на производственную мощность 5 млн т, что может привести к прорывам вод в подземные горные выработки. Выполнено прогнозное моделирование совместной работы системы осушения и участков закачки дренажных вод нижнекаменноугольного водоносного горизонта с целью обеспечения безопасных условий ведения горных работ.

Яковлевский рудник, система осушения, нижнекаменноугольный водоносный горизонт, водопонижающие скважины, наклонно-восстающие скважины, закачка дренажных вод

DOI: 10.15372/FTPRPI20240119

EDN: TKMLES

Разработка Центрального участка Яковлевского месторождения по добыче железных руд ведется подземным способом под защитой предохранительного целика мощностью 65 м и со-пряжена с откачкой значительных объемов дренажных вод. Водоприток к горным выработкам Яковлевского рудника формируется за счет подземных вод нижнекаменноугольного и руднокристаллического водоносных горизонтов, в незначительной степени келловейского водоносного горизонта, воды которого фильтруются в нижнекаменноугольные отложения на локальных участках в центре депрессии через пласт глин бат-байоса [1–5]. Осушение рудного тела осуществляется горизонтальными, наклонно-восстающими, разведочными и техническими скважинами, дренирующими руднокристаллический водоносный пласт с целью опережающего снятия напоров нижнекаменноугольного водоносного горизонта. Откачиваемые дренажные воды извлекаются на поверхность, отстаиваются в пруде-отстойнике и сбрасываются в р. Ворсклу.

В качестве поглощающего горизонта использовался нижнекаменноугольный водоносный горизонт, в котором сформировалась депрессионная воронка в результате ранее проводимых водопонижений, многолетней работы дренажной системы рудника и существующего перетока в руднокристаллическую толщу. Вышелегающие водоносные горизонты служат для хозяйственного-питьевого водоснабжения, в них с экологической точки зрения нельзя осуществлять закачку дренажных вод, а руднокристаллический водоносный горизонт обладает низкими фильтрационными параметрами, в него невозможно закачать значительный объем дренажных вод.

ЧИСЛЕННАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Гидрогеологические расчеты в условиях взаимодействующих водоносных горизонтов, фильтрационной неоднородности водоносных пластов, недостаточной изученности источников формирования запасов и их возможного изменения в процессе эксплуатации дренажной системы рудника, необходимости решения обратных калибровочных задач для построения надежных гидрогеологических моделей выполняются с помощью численного моделирования [6 – 14]. Для оценки возможности обратной закачки дренажных вод в нижнекаменноугольную толщу разработана пятислойная пространственная модель фильтрации подземных вод, включающая келловейский водоносный горизонт, слабопроницаемые глины бат-байоса, нижнекаменноугольный и руднокристаллический водоносные горизонты, взаимосвязанные через разделяющий слабопроницаемый слой.

Келловейский водоносный горизонт приурочен к песчаной толще, имеющей многочисленные маломощные прослои песчаников, реже глин, с коэффициентом фильтрации $k_f = 0.3 - 2.2$ м/сут. Нижнекаменноугольный водоносный горизонт залегает в толще известняков с прослойми сланцеватых и углистых глин в нижней части разреза, k_f пород 0.01 – 10.0 м/сут. Руднокристаллический водоносный горизонт приурочен к трещиноватой зоне коры выветривания докембрийских кристаллических пород и зонам дизъюнктивных нарушений. Для рыхлых разностей богатых железных руд k_f изменяется от 0.04 до 0.28 м/сут, а в сланцах и кварцитах не превышает 0.01 м/сут. Нижнекаменноугольный и руднокристаллические водоносные горизонты гидравлически связаны через глинистые отложения в подошве каменноугольных пород, плотные переотложенные руды и карбонатизированные бокситовые образования в кровле руднокристаллической толщи.

Математическое моделирование проводилось по программе MODFLOW лицензионного пакета GMS, широко применяемой в России для решения различных гидрогеологических задач. Для моделирования принята область фильтрации размером 30×30 км. Внешние границы являются естественными областями питания потока подземных вод. Фильтрационный поток исследуемой области моделировался неравномерной прямоугольной сеткой, состоящей из 219 961 (469×469) блоков. Размеры блоков изменяются от 12.5×12.5 м в центральной части модели до 100×100 м на периферийных участках.

По внешней границе модели реализованы граничные условия III рода (зависимость между изменениями расхода на границе и изменениями уровня воды в самой области фильтрации), учитывающие расширение области фильтрации при осушении водоносных горизонтов путем введения дополнительного фильтрационного сопротивления, которое рассчитывалось по методике [15]. Практически исключалась погрешность, вносимая искусственным ограничением напоров по контуру внешней границы изучаемой площади.

Нижняя граница области фильтрации задана по отм. – 800 м в соответствии с данными о распространении тектонических разломов в массиве руднокристаллических пород до глубины 1 км [1]. Горные выработки задавались в модели с помощью граничных условий III рода по отм. – 425 и – 525 м через дополнительное фильтрационное сопротивление [16], учитываю-

щее замену горных выработок расчетным блоком, связанным с размером шага разбивки поля сетки и несоответствием размеров блока модели и горной выработки. Дренажные устройства в подземных горных выработках на модели реализованы путем их предварительного приведения к вертикальной скважине с использованием метода фильтрационных сопротивлений и учетом несоответствия модельных и фактических размеров обобщенной дренажной системы.

Дополнительное сопротивление для задания граничных условий III рода на скважине, реализующей дренажные устройства, определялось по формуле: $\Phi = 1 / km[0.366 \log(\Delta x / r_0) - 0.25]$, где km — водопроводимость пласта; Δx — размер блока сеточной модели в точке расположения дренажного устройства; r_0 — приведенный радиус дренажного устройства [15].

Решению прогнозных задач предшествовал этап калибровки математической модели путем решения обратной задачи, основная цель которой — достижение максимально возможного соответствия построенной фильтрационной модели исследуемому гидрогеологическому объекту. В процессе калибровки модели уточнялись фильтрационные характеристики изучаемого водоносного пласта в плане и разрезе. Определено, что фильтрационные параметры келловейских песков относительно однородные, при расчетах получен k_f песков $0.5 - 0.7$ м/сут. Батбайосские глины в центре депрессионной воронки имеют $k_f = 10^{-4}$ м/сут, за пределами депрессии — $k_f = 10^{-6}$ м/сут. Значительная дифференциация k_f наблюдается в нижнекаменноугольном водоносном пласте: по площади распространения рудных тел и в северо-восточной части висячего бока 5 м/сут, в лежачем боку и северо-западной части висячего бока $0.08 - 0.25$ м/сут. Слабопроницаемый разделяющий слой между нижнекаменноугольным и руднокристаллическим водоносными горизонтами характеризуется в центре воронки депрессии коэффициентом $k_f = 2.5 \cdot 10^{-4}$ м/сут, за пределами воронки — $k_f = 5 \cdot 10^{-6}$ м/сут. В руднокристаллической толще k_f по площади распространения рудных тел составил $0.10 - 0.06$ м/сут, сланцев висячего бока — 0.005 м/сут, сланцев лежачего бока — 0.02 м/сут.

Водоприток к системе осушения рудника формируется в основном за счет подземных вод из руднокристаллического водоносного горизонта и перетока из нижнекаменноугольной толщи через слабопроницаемые породы, залегающие в кровле руднокристаллического массива (540 м 3 /ч). Из келловейского водоносного горизонта в нижнекаменноугольную толщу поступает порядка 65 м 3 /ч через слабопроницаемые глины бат-байоса.

ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОСУШЕНИЯ И УЧАСТКА ОБРАТНОЙ ЗАКАЧКИ ДРЕНАЖНЫХ ВОД

Для определения общего количества дренажных вод, объем которых возможно использовать для закачки в глубокие геологические структуры, выполняется прогнозное моделирование поступления водопритока к элементам дренажной системы. В связи с отсутствием утвержденной системы осушения нижнекаменноугольного водоносного горизонта прогнозные расчеты выполнены для двух базовых вариантов:

- поверхностный способ осушения с линейной системой расположения водопонижающих скважин за границей зоны сдвижения;
- подземный способ осушения с площадным расположением дренажных наклонно-восстающих скважин, закладываемых с гор. — 370 м.

При поверхностном способе осушения снижение напоров в нижнекаменноугольной толще осуществляется 26 водопонижающими скважинами, расположенными в 200 м от отрабатываемого участка рудного поля за границей зоны сдвижения в северо-восточной части висячего бока, характеризующейся $k_f = 5$ м/сут. Расстояние между скважинами 150–200 м. Водопони-

жающие скважины реализованы в модели с помощью граничных условий II рода (задание постоянного расхода во времени) условием $Q = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$. При подземном способе осушения снижение напоров в нижнекаменноугольном горизонте выполняется 74 наклонно-восстающими скважинами, сооруженными с гор. -370 м по дренажным ортам с шагом 50 м. Реализация в модели наклонно-восстающих скважин в системе подземных горных выработок проводилась посредством их предварительного приведения к вертикальным скважинам с помощью метода фильтрационных сопротивлений. Прогнозный водоприток к наклонно-восстающим скважинам определен в объеме $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Прогнозное моделирование выполнялось при совместной работе поверхностной системы осушения нижнекаменноугольного водоносного горизонта и участка обратной закачки дренажных вод. Дебит обратной закачки дренажных вод соответствовал притоку к дренажной системе, для чего использовалась итерационная процедура, которая завершалась при равенстве дебитов откачки и закачки. Пластовые и дренажные воды нижнекаменноугольного водоносного горизонта имеют однотипный состав. Поступление в пласт дренажных вод не нарушает равновесие между подземными водами и породами, не способствует развитию процессов физико-химического взаимодействия, что позволяет проводить закачку дренажных вод в нижнекаменноугольный водоносный горизонт без водоподготовки.

В расчетах соблюдалось основное требование закачки — уровни в скважинах на участках закачки должны быть ниже поверхности земли, т. е. закачка осуществляется в свободном режиме. Участки закачки выбирались исходя из степени изученности нижнекаменноугольных известняков в период ранее проведенных геологоразведочных работ. Выбрано четыре возможных участка закачки дренажных вод, расположенных в юго-восточной части висячего бока рудной залежи, где нижнекаменноугольный водоносный горизонт имеет $k_f = 5.0 \text{ м}/\text{сут}$, и один участок закачки в лежачем боку с k_f нижнекаменноугольных известняков $1.5 \text{ м}/\text{сут}$ (рис. 1).

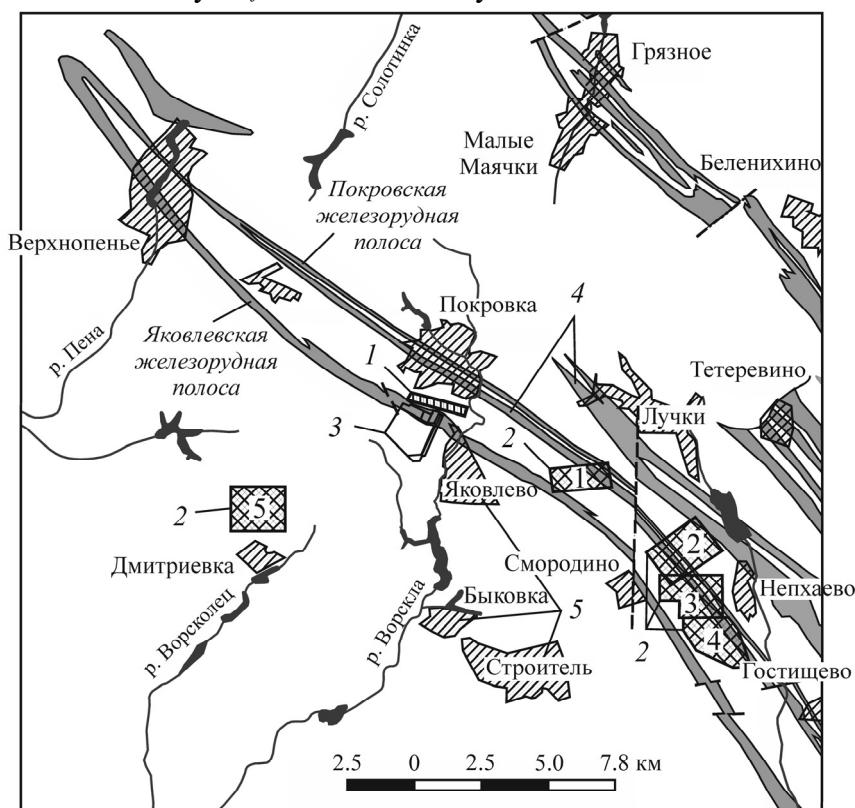


Рис. 1. Исследуемые участки закачки дренажных вод: 1 — участок осушения; 2 — участки закачки дренажных вод; 3 — горные выработки; 4 — рудные полосы; 5 — населенные пункты

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты прогнозного моделирования при совместной работе системы осушения и участка обратной закачки дренажных вод приведены в таблице.

Результаты прогнозного моделирования

Участок	Расстояние от центра системы осушения до участка закачки, км	Водоотбор системой осушения без закачки дренажных вод, м ³ /ч	Количество водопонижающих скважин в системе осушения без закачки дренажных вод, шт.	Количество скважин на участке закачки, шт.	Дебит одной закачочной скважины, м ³ /ч	Суммарный дебит закачки с учетом возврата утилизированных дренажных вод, м ³ /ч	Водоприток к системе осушения с учетом возврата утилизированных дренажных вод, м ³ /ч	Увеличение водопритока к системе осушения за счет возврата утилизированных вод, %	Количество водопонижающих скважин в системе осушения, шт.
1	6.0	1560	26	90	30	2700	2700	73	45
2	10.8	1560	26	80	25	2000	2000	28	33
3	12.1	1560	26	80	23	1830	1830	17	31
4	13.7	1560	26	80	21	1670	1670	7	28
5	7.8	1560	26	100	11	1125	1125	—	—

Прогнозное распределение уровней подземных вод нижнекаменноугольного водоносного горизонта в условиях совместной работы поверхностной системы осушения и исследуемых участков закачки дренажных вод показано на рис. 2. Зафиксировано, что в процессе закачки на участках 1–4 приток подземных вод к системе осушения вырастет до 2700–1670 м³/ч, водоприток за счет возврата утилизируемых дренажных вод к системе дренажа увеличится на 1140–110 м³/ч. При размещении участка закачки в висячем боку рудной залежи на расстоянии 6 км от системы осушения отмечается максимальное увеличение водопритока к системе осушения за счет возврата утилизированных вод (73%). При расположении участка закачки на расстоянии 13.7 км от системы осушения наблюдается минимальное увеличение водопритока к системе осушения за счет возврата утилизированных вод (7%). Рост водопритока к системе дренажа приводит к увеличению количества поверхностных водопонижающих скважин. Так, эксплуатация ближайшего к Яковлевскому руднику участка 1 приведет к увеличению количества скважин в системе осушения с 26 до 45 шт. при среднем дебите одной скважины 60 м³/ч. Закачка на наиболее удаленном участке 4 потребует увеличения количества скважин в системе осушения с 26 до 28 шт. Для закачки дренажных вод в нижнекаменноугольный водоносный горизонт целесообразно использовать участки 2–4, расположенные в висячем боку рудной залежи на расстоянии 10.8–13.7 км от поверхностной системы осушения. Участки 1 и 5 не эффективны для закачки: на участке 1 ожидается слишком большой объем возврата закачиваемых дренажных вод, а на участке 5 невозможно утилизировать весь объем откачиваемых дренажных вод из-за низких фильтрационных свойств пород.

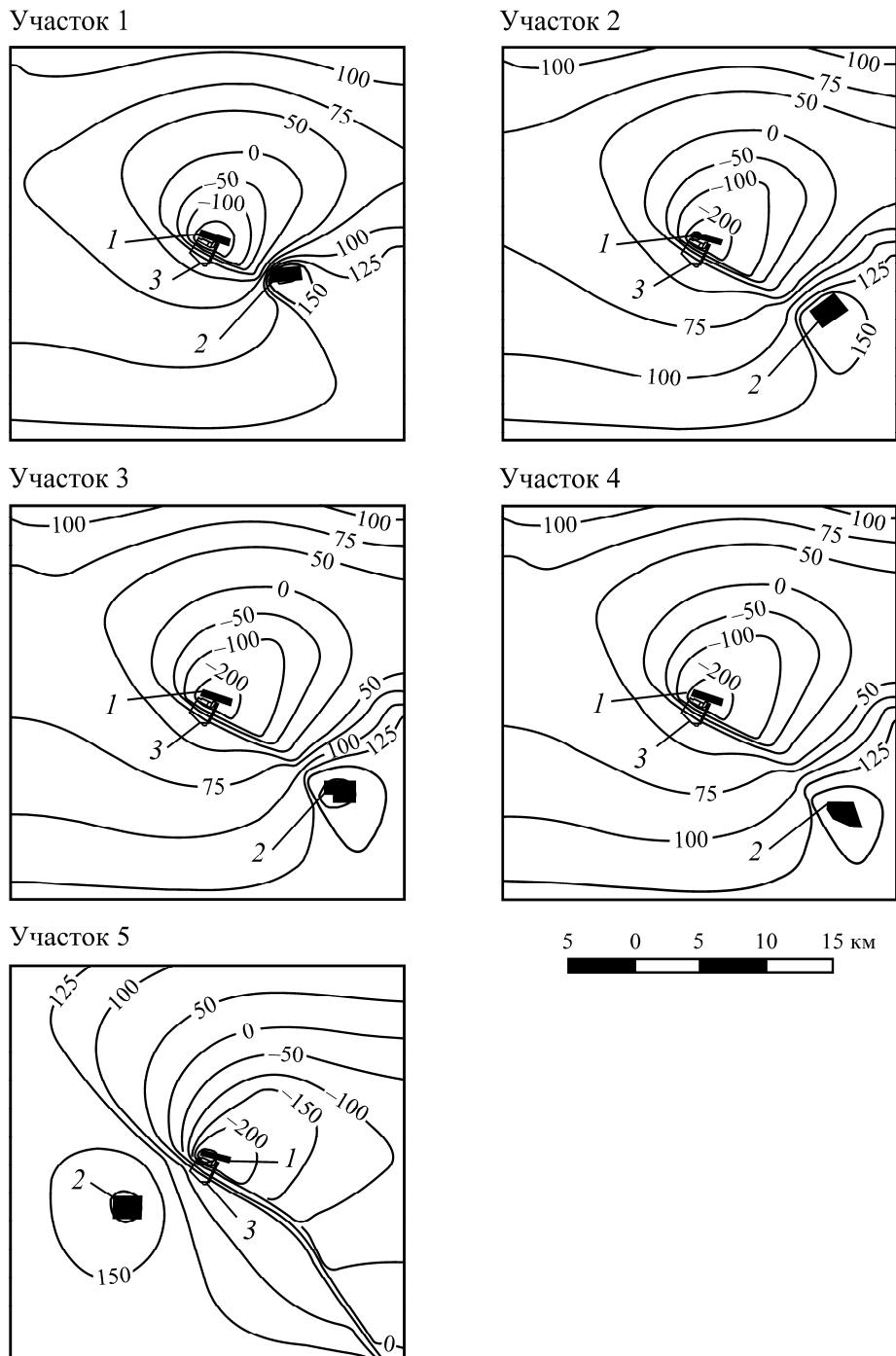


Рис. 2. Прогнозное распределение уровня нижнекаменноугольного водоносного горизонта при совместной работе системы осушения и участков закачки дренажных вод (м абр.): 1 — участок откачки; 2 — участок закачки; 3 — горные выработки

Наиболее приемлемым для закачки дренажных вод в нижнекаменноугольный водоносный горизонт является участок 3 по следующим параметрам:

- позволяет закачать расчетный объем дренажных вод в размере $1830 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- увеличение водопритока к системе осушения за счет возврата утилизированных вод составит 17 % ($270 \text{ м}^3/\text{ч}$);

— через территорию участка закачки проходит автомобильная дорога с твердым покрытием, что минимизирует затраты на обеспечение транспортной инфраструктуры участка закачки при его строительстве и эксплуатации.

ВЫВОДЫ

Выявлены источники формирования притоков подземных вод к горным выработкам в слоистом водоносном комплексе применительно к условиям эксплуатации Яковлевского месторождения при выходе на проектную мощность 4.5 млн т/год. Установлено наличие гидродинамических условий для осуществления обратной закачки дренажных вод в нижнекаменноугольные отложения: относительно высокая водопроводимость 100–350 м²/сут, однотипный состав пластовых и дренажных вод, позволяющий закачивать дренажные воды без водоподготовки.

Численным моделированием получены параметры совместной работы системы осушения нижнекаменноугольного водоносного горизонта и участка обратной закачки дренажных вод в осушаемый водоносный горизонт. Для закачки дренажных вод рекомендуется использовать участок 3, на котором возможно закачать 1830 м³/ч дренажных вод, в том числе 270 м³/ч — возврат утилизированных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геология, гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии (КМА). Т. 2. Гидрогеология и инженерная геология / под ред. А. Т. Бобрышева. — М.: Недра, 1972. — 479 с.
2. Гидрогеология СССР. Т. IV. Воронежская, Курская, Белгородская, Брянская, Орловская, Липецкая, Тамбовская области / под ред. А. Т. Бобрышева. — М.: Недра, 1972. — 499 с.
3. Оксанич И. Ф., Береснев В. С., Гордон А. В. и др. Осушение месторождений при строительстве железорудных предприятий. — М.: Недра, 1977. — 285 с.
4. Орлов В. П., Шевырев И. А., Соколов Н. А. Железные руды КМА. — М.: Геоинформмарк, 2001. — 615 с.
5. Протосян А. Г., Трушко В. Л. Прогноз устойчивости выработок в низкопрочных железистых рудах Яковлевского месторождения // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 49–61.
6. Еланцева Л. А., Зайцев Д. А., Фоменко С. В. Гидрогеологические прогнозы в целях осушения месторождения алмазов им. В. Гриба // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2019. — Т. 330. — № 7. — С. 53–61.
7. Еланцева Л. А., Фоменко С. В. Прогноз изменения пьезометрической поверхности метегеричерского водоносного комплекса подземного рудника “Интернациональный” (Якутия) // Вестн. ВГУ. Серия: Геология. — 2021. — № 2. — С. 94–102.
8. Еланцева Л. А., Фоменко С. В., Афанасьев А. Ю. Утилизация дренажных рассолов рудника “Удачный” методом обратной закачки // Горн. журн. — 2021. — № 8. — С. 71–75.
9. Гриневский С. О. Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод. — М.: Инфра-М, 2020. — 153 с.
10. Su Y. and Davidson J. H. Modeling approaches to natural convection in porous media, Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, Springer, 2015, X. — 47 p.

11. **Depner J. S. and Rasmussen T. C.** Hydrodynamics of time-periodic groundwater flow, Diffusion Waves in Porous Media, Wiley AGU, 2017. — 324 p.
12. **Ravshanov N., Abdullaev Z., and Khafizov O.** Modeling the filtration of groundwater in multilayer porous media, Construction Unique Buildings Structures, 2020, Vol. 92.
13. **Daliev S., Abdullaeva B., Kubyasev K., and Abdullaev O.** Numerical study of filtration process of ground and pressure waters in multilayer porous media, Int. Conf. Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE-2020), 2020, Vol. 896.
14. **Ravshanov N., Abdullaev Z., and Khafizov O.** Numerical study of fluid filtration in three-layer interacting pressure porous formations, Int. Scientific Conf. “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONMECHYDRO-2021), 2021, Vol. 264.
15. **Лукнер Л., Шестаков В. М.** Моделирование геофильтрации. — М.: Недра, 1976. — 407 с.
16. **Фисун Н. В., Ленченко Н. Н.** Динамика подземных вод. — М.: Науч. мир, 2016. — 267 с.

Поступила в редакцию 06/IV 2023

После доработки 25/V 2023

Принята к публикации 24/I 2024