

– для расчета необходимого количества воздуха при проектировании горных работ с использованием самоходного оборудования с ДВС проектным организациям необходимо обращаться на завод изготовитель автотракторной техники с официальным запросом о марке ДВС, применяемом топливе, используемых системах очистки отработавших газов и токсичности выхлопных газов;

– необходимо соблюдать требования по эксплуатации водяного нейтрализатора;

– в мегаполисах производить периодические замеры концентрации отработавших газов ДВС на основных магистралях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алыменко Н.И., Алыменко Д.Н., Коровин А.И., Пшеничников С.В. Вентиляторные эжекторные установки для рудников // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 73-77.
2. Петров А.И., Алыменко Н.И., Каменских А.А. Переменный режим проветривания рабочей зоны. Технико-экономическое обоснование // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 9 (118). – С. 15-19.
3. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом: ПБ 03-553-03: Утв. Госгортехнадзором России 13.05.2003 г. / Федер. горн. и пром. надзор России – М.: Пром. безопасность, 2003. – 200 с.
4. Жегалин О.И., Лупачев П.Д. Снижение токсичности автомобильных двигателей. – М.: Транспорт, 1985. – 120 с.: ил.
5. Инструкция по безопасному применению самоходного (нерельсового) оборудования в подземных рудниках: Утв. Госгортехнадзором СССР 20.06.72 г. – М.: Недра, 1973. – 34 с.
6. Малов Р.В., Ерохов В.И., Щетина В.А., Беляев В.Б. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды. – М.: Транспорт, 1982. – 200 с.: ил.
7. Новиков Ю.В. Экология, окружающая среда и человек: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Фаир-Пресс, 2002. – 550 с.: ил.
8. Павлова И.В. Автомобили, экономия, экология // Есть идея! – 1996. – № 8. – С. 4.
9. Об утверждении технического регламента «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ»: Постановление правительства РФ от 12 окт. 2005 года N 609 – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901950808>.
10. Правила технической безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь – Минск, 2006. – 143 с.
11. Способ нейтрализации отработавших газов двигателя внутреннего сгорания: пат. 2197621 Рос. Федерация: МПК⁷ F 01 N 3/34 / Алыменко Н.И., Нехорошков А.В., Алыменко Д.Н., Чистяков А.Н., Минин В.В., Южанин С.Н.; заявитель и патентообладатель ОАО «Сильвинит». – № 2001104330/06; заявл. 19.02.01; опубл. 27.01.03, Бюл. № 3. –
12. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Вып. 78: утв. 11.12.2013, № 32935. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 276 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03).
13. Якубовский Ю.С. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды. – М.: Транспорт, 1979. – 198 с.

УДК 622.253

DOI: 10.7242/ЕСНО.2019.1.17

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ СТРОЯЩИХСЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ ПОСРЕДСТВОМ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ ЗАДАЧИ ДАРСИ-СТЕФАНА

М.А. СЕМИН

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье рассмотрена двумерная двухфазная задача Дарси-Стефана применительно к проблеме искусственного замораживания обводненного породного массива при проходке шахтных стволов. Численное решение поставленной задачи получено с использованием метода конечных разностей на регулярной неоднородной сетке. Исследована зависимость времени смыкания ледопородного ограждения от

фильтрационных характеристик породного массива и параметров фазового перехода влаги для условий строящихся шахтных стволов рудника Петриковского горно-обогатительного комбината. Определены критические скорости фильтрации грунтовых вод, влияние которых следует учитывать при моделировании замораживания породного массива. Получено, что задаваемые зависимости количества незамерзшей влаги в массиве и проницаемости массива от температуры сильно влияют на поле скоростей грунтовых вод и расчетные параметры ледопородного ограждения.

Ключевые слова: ледопородное ограждение, численное моделирование, задача Дарси-Стефана, шахтный ствол, искусственное замораживание грунтов.

Строительство шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях требует применения специальных способов проходки, направленных на предварительное упрочнение пород, окружающих ствол, и на гидроизоляцию забоя ствола [1]. Наиболее популярным специальным способом является способ искусственного замораживания пород, целью которого является формирование вокруг строящейся горной выработки ледопородного ограждения расчетной толщины, достаточной для восприятия давления со стороны окружающего обводненного массива [2, 3]. Для определения момента достижения расчетной толщины ледопородного ограждения (ЛПО) используются как методы экспериментального мониторинга, так и методы математического прогнозирования теплового режима замораживаемого породного массива [4-8].

В условиях высоких скоростей движения грунтовых вод в пористом массиве проведение корректного математического прогнозирования теплового режима замораживаемого породного массива возможно только при рассмотрении сопряженной задачи о тепло- и массопереносе, или задачи Дарси-Стефана [9, 10]. На сегодняшний день в литературе описан ряд исследований задачи Дарси-Стефана применительно к проблемам замораживания и размораживания грунтов в различных природных и технических системах [9-12].

В настоящем исследовании рассматривается задача об искусственном замораживании обводненного породного массива при формировании ЛПО в поле горизонтального течения грунтовых вод, далее – задача Дарси-Стефана. Принимается, что в породном массиве происходят следующие физические процессы, имеющие существенное влияние на распределение температур:

- 1) фильтрация грунтовых вод;
- 2) диффузионно-конвективный теплоперенос;
- 3) фазовый переход грунтовых вод из жидкого в твердое состояние;
- 4) теплообмен между породным массивом и хладоносителем, циркулирующим по замораживающим колонкам.

При постановке задачи Дарси-Стефана для обводненного породного массива принимаются следующие гипотезы и допущения:

- 1) изотропность и однородность теплофизических свойств породного массива;
- 2) тепло- и массоперенос в вертикальном направлении пренебрежимо мал по сравнению с горизонтальным;
- 3) фильтрация грунтовых вод происходит только под действием горизонтального градиента давления;
- 4) породный массив считается полностью водонасыщенным;
- 5) грунтовая вода и лёд считаются несжимаемыми;
- 6) замораживающие колонки имеют отклонения от вертикали, обусловленные погрешностью при бурении.

Сделанные гипотезы позволяют перейти от трехмерной постановки задачи к двумерной и рассмотреть горизонтальный слой породного массива. Уравнения баланса

массы и энергии в горизонтальном слое породного массива запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial(\rho_l w n)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i (1-w)n)}{\partial t} + \nabla_{(x,y)} \cdot (\rho_l \mathbf{v}_l) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_{tot}}{\partial t} + \mathbf{v}_l \cdot \nabla_{(x,y)} H_l = \nabla_{(x,y)} \cdot (\lambda(w) \nabla_{(x,y)} T), \quad (2)$$

где ρ_l — плотность грунтовых вод, кг/м³; w — содержание незамерзшей грунтовой воды; n — пористость; ρ_i — плотность льда, кг/м³; \mathbf{v}_l — вектор скорости течения грунтовых вод, м/с; H_{tot} — удельная энтальпия обводненного породного массива (порода + вода), Дж/(кг·°C); H_l — удельная энтальпия грунтовых вод, Дж/(кг·°C); λ — теплопроводность обводненной породы, Вт/(м·°C); T — температура обводненной породы, °C; t — переменная времени, с; $\nabla_{(x,y)}$ — набла-оператор Гамильтона в плоском случае.

Теплопроводность обводненного породного массива зависит от содержания незамерзшей грунтовой воды согласно следующему закону:

$$\lambda(w) = \lambda_1 w + \lambda_2 (1-w), \quad (3)$$

где λ_1 — теплопроводность мерзлой породы, Вт/(м·°C); λ_2 — теплопроводность талой породы, Вт/(м·°C).

Вектор скорости течения грунтовых вод рассчитывается из уравнения Дарси:

$$\mathbf{v}_l = -\frac{k_r}{\mu_l} \cdot k \nabla p_l, \quad (4)$$

где k_r — относительная проницаемость; k — абсолютная проницаемость породы, м²; μ_l — динамическая вязкость грунтовых вод, Па·с; p_l — гидростатическое давление в поровом пространстве пород, Па.

Вся информация о фазовом переходе «зашивается» в зависимости удельных энтальпий $H_{tot}(T)$ и $H_l(T)$ от температуры породного массива. Зависимость удельной энтальпии H_{tot} обводненного породного массива от температуры обводненного породного массива T имеет следующий вид:

$$H_{tot}(T) = \begin{cases} \rho_2 c_2 (T - T_{sc}) + \rho_l n L, & T \geq T_{sc} \\ \rho_1 c_1 (T - T_{sc}) + \rho_l n w(T) L, & T < T_{sc} \end{cases}, \quad (5)$$

где ρ_1 — плотность мерзлой горной породы, кг/м³; ρ_2 — плотность талой горной породы, кг/м³; c_1 — удельная теплоемкость мерзлой горной породы, кг/м³; c_2 — удельная теплоемкость талой горной породы, кг/м³; L — удельная теплота фазового перехода грунтовой воды, Дж/кг; T — температура горной породы, °C; T_{sc} — температура начала кристаллизации (или температура ликвидуса), °C.

Следует отметить, что под энтальпией H_{tot} понимается сумма энтальпии породного массива (поровой матрицы) и энтальпий воды и льда, содержащихся в порах.

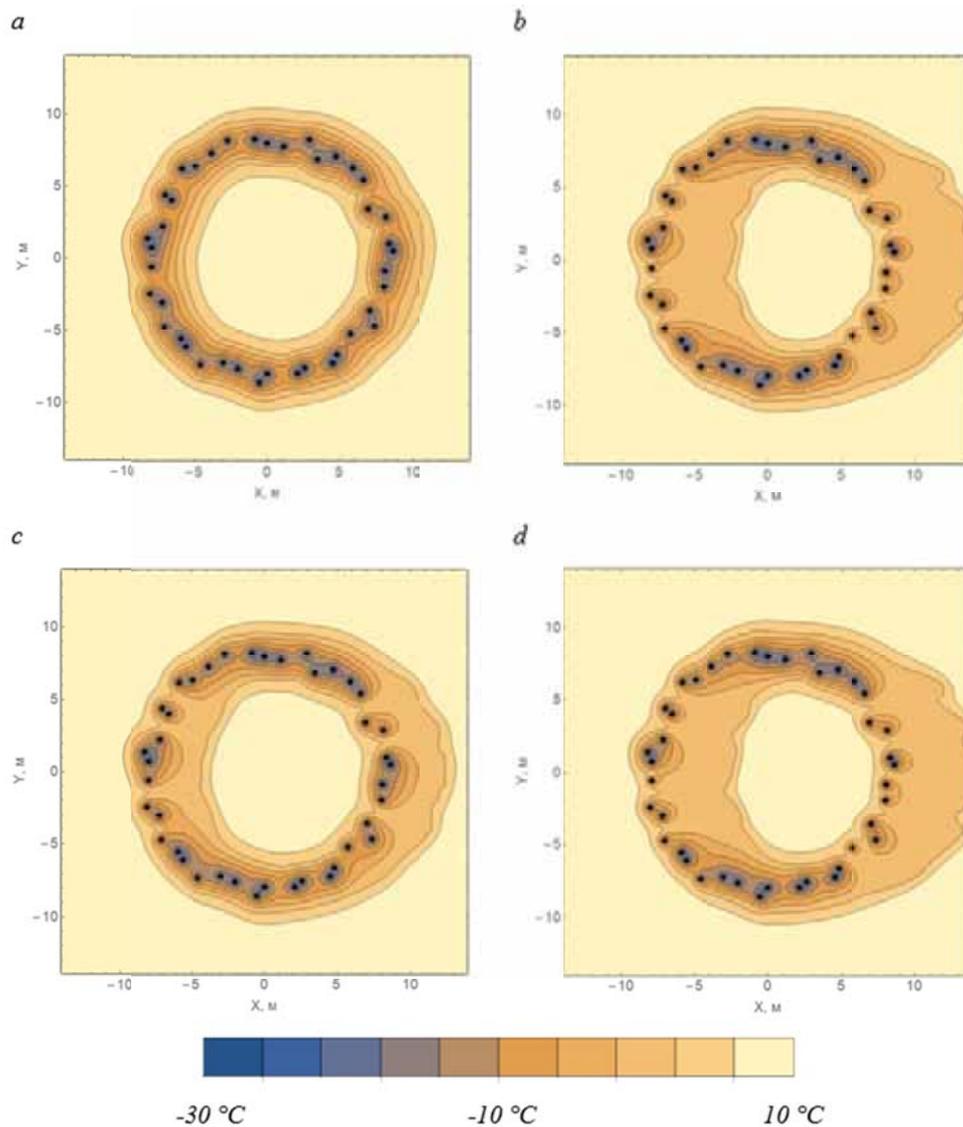


Рис. 1. Распределение температур в горизонтальном слое породного массива после 60 суток с момента начала замораживания при различных значениях скорости грунтовых вод: (а) — 10 мм/сутки, (б) — 50 мм/сутки, (в) — 100 мм/сутки, (г) — 150 мм/сутки

Зависимость удельной энтальпии H_l воды в порах от температуры обводненного породного массива T имеет следующий вид:

$$H_l(T) = \begin{cases} \rho_l c_l n (T - T_{sc}) + \rho_l n L, & T \geq T_{sc} \\ \rho_l n w(T) L, & T < T_{sc} \end{cases} \quad (6)$$

Как следует из (6), при температурах ниже температуры начала плавления энтальпия воды в порах принимается равной нулю. Это обусловлено тем, что при таких температурах незамерзшая вода в порах отсутствует.

Задача (1) — (6) дополняется соответствующими начальными условиями и граничными условиями на замораживающих колонках и на внешней границе прямоугольной расчетной области.

Численное решение задачи Дарси-Стефана получено с использованием метода конечных разностей, явной схемы по времени первого порядка точности и второго

порядка точности по пространству [13, 14]. Решение строилось на регулярной неоднородной прямоугольной сетке. Размер сетки на удалении от скважин и сгущение вблизи скважин выбирались на основании предварительных расчетов таким образом, чтобы обеспечить распределение температур, не зависящее от свойств сетки. Расчет проводился для условий промплощадки Петриковского Горно-обогатительного комбината. Рассматривался слой песчаника в интервале глубин 136-146 м. Отклонения положений замораживающих колонок на глубине 136-146 м принимались, исходя из данных инклинометрии скважин.

На рис. 1 показано распределение температуры в горизонтальном слое породного массива после 60 суток с момента начала замораживания при различных значениях скорости грунтовых вод. Получено, что существенное влияние течения грунтовых вод на формирование ЛПО возникает при скоростях фильтрации около 50 мм/сутки. Под существенным влиянием в данной ситуации понимается уменьшение толщины ЛПО более чем на 5%.

При проведении численного моделирования получено, что критическая скорость фильтрации, при которой течение грунтовых существенно влияет на замораживание массива, в свою очередь сильно зависит от вида кривой содержания незамерзшей грунтовой воды $w(T)$ и кривой относительной проницаемости обводненных пород $k_r(T)$ при вариации температуры породного массива T . Это свидетельствует о важности корректного экспериментального определения указанных кривых и корректного их учета при моделировании замораживания породного массива.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации в рамках научного проекта № МК-6244.2018.5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нечаенко В.И. Технология строительства вертикальных стволов в сложных горно-геологических условиях: дисс. ... канд. техн. наук: 05.15.04. – Тула, 1998. – 204 с.
2. Alzoubi M.A., Sasmito A.P., Madiseh A., Hassani F.P. Intermittent Freezing Concept for Energy Saving in Artificial Ground Freezing Systems // *Energy Procedia*. – 2017. – V. 142. – P. 3920-3925. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.297.
3. Holden J.T. Improved thermal computations for artificially frozen shaft excavations // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1997. – V. 123, № 8. – P. 696-701. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:8(696).
4. Hentrich N., Franz J. About the application of conventional and advanced freeze circle design methods for the Ust-Jaiwa freeze shaft project // *Vertical and Decline Shaft Sinking: Good Practices in Technique and Technology*, International Mining Forum, 23-27 february, Poland. – CRC Press/Balkema, 2015. – P. 89-104.
5. Kim Y.S., Kang J.-M., Lee J., Hong S.-S., Kim K.-J. Finite element modeling and analysis for artificial ground freezing in egress shafts // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2012. – V. 16, № 6. – P. 925-932. DOI: 10.1007/s12205-012-1252-y.
6. Каймонов М.В., Хохолов Ю.А., Курилко А.С., Необутов Г.П. Методика расчета послойного намораживания пород при формировании льдопородного массива в горных выработках // *Горн. информ.-аналит. бюл.* – 2003. – № 9. – С. 47-49.
7. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Решение обратной задачи Стефана при анализе замораживания грунтовых вод в породном массиве // *Инженерно-физический журнал*. – 2018. – Т. 91, №3. – С. 655-663.
8. Левин Л.Ю., Семин М.А., Паршаков О.С. Математическое прогнозирование толщины льдопородного ограждения при проходке стволов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2017. – № 5. – С. 154-161.
9. Rodrigues J.F., Urbano J.M. On a Darcy-Stefan problem arising in freezing and thawing of saturated porous media // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. – 1999. – V. 11, № 3. – P. 181-191. DOI: 10.1007/s001610050110.
10. Sazhenkov S.A. Studying the Darcy-Stefan problem on phase transition in a saturated porous soil // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2008. – V. 49, № 4. – P. 587-597. DOI: 10.1007/s10808-008-0076-5.

11. Huang S., Guo Y., Liu Y., Ke L., Liu G., Chen C. Study on the influence of water flow on temperature around freeze pipes and its distribution optimization during artificial ground freezing // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – V. 135, May. – P. 435-445. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.090.
12. Hu R., Liu Q., Xing Y. Case study of heat transfer during artificial ground freezing with groundwater flow // *Water (Switzerland)*. – 2018. – V. 10, № 10. – Номер статьи 1322. DOI: 10.3390/w10101322.
13. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2019. – № 1. – С. 172-184.
14. Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Семин М.А. Контроль теплового режима породного массива на основе применения оптоволоконных технологий мониторинга температур в скважинах // *Горное эхо*. – 2016. – № 1 (62). – С. 35-37.

УДК 622.253

DOI: 10.7242/ECHO.2019.1.18

УСТОЙЧИВОСТЬ КОНВЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА В ШАХТНЫХ СТВОЛАХ

А.В. ШАЛИМОВ

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье представлены результаты исследований устойчивости конвективного движения воздуха в шахтных стволах после отключения источника тяги. На основе численного моделирования установлено, что проветривание рудника естественной тягой нарушается путём образования протяжённых по глубине ствола воздушных вихрей. В приближении плоскопараллельного ламинарного течения несжимаемой среды с вертикальным градиентом температуры в поле силы тяжести определены поперечные профили скорости движения и температуры воздуха. Проведены аналитические вычисления устойчивости найденного течения к плоским длинноволновым возмущениям, в результате которых определено значение критического параметра Рэлея. Смоделирована поправка к коэффициенту объёмного расширения воздуха, позволяющая учесть гидростатическую сжимаемость воздуха. Получена зависимость для расчёта критического значения вертикального градиента температуры воздуха в стволе, превышение которого ведёт к образованию конвективных вихрей и нарушению сквозного проветривания.

Ключевые слова: рудник, ствол, естественная тяга, конвекция, депрессия, теплообмен, устойчивость, объёмное расширение, гидростатическое сжатие.

Направление и интенсивность движения воздуха по горным выработкам определяется по совокупному действию всех источников тяги, к числу которых относится также и естественная тяга. В штатных режимах проветривания действие её не велико, составляет порядка 1% общей депрессии для рудников с одноуровневыми стволами и фигурирует в качестве поправок в вентиляционных расчётах. В случае возникновения пожара одной из возможных мер, принимаемых для ликвидации возгорания и недопущения распространения по выработкам продуктов горения, является останов вентилятора, после чего естественная тяга становится единственным источником поступления воздуха в рудник [1].

Осуществление прогноза проветривания рудника в подобной ситуации с помощью стандартных методов проведения вентиляционных расчётов невозможно по причине неоднозначности решений, реализуемость каждого из которых определяется совокупностью всех условий. Например, летом, когда наружный воздух более тёплый и менее плотный, чем рудничный, можно с уверенностью сказать, что естественной тяги не будет. Зимой же есть три сценария движения воздуха – прямой, нулевой и обратный, а интенсивность проветривания также под вопросом, т.к. зависит от величины общей тепловой депрессии, которая, в свою очередь, зависит от скорости движения воздуха через теплообмен. Неопределённость усугубляется наличием нескольких вентиляционных горизонтов, инициирующих появление тепловой межгоризонтной