ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(2):13-21
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.272 (571.56) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-13-21

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА, ПРОИСХОДЯЩИХ В ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ ПОДУШКЕ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОРАБОТКЕ ПОДКАРЬЕРНЫХ ЗАПАСОВ

Ю.А. Хохолов

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН,
Якутск, Россия, e-mail: khokholov@igds.ysn.ru

Аннотация: Приведены результаты исследований на математической модели и выявлены особенности процессов тепло-и массообмена в предохранительной подушке, отсыпанной на дне отработанного карьера, которые определяют ее подвижность и фильтрационные свойства в ходе эксплуатации при подземной доработке подкарьерных запасов кимберлитовой трубки системами с обрушением. Приведены распределения температуры и влажности (льдистости) по глубине предохранительной подушки при различных значениях депрессии (разности давлений) на ее верхней и нижней границах, в условиях восходящего потока теплого рудничного воздуха. Подчеркивается ведущая роль тепло- и массообменных процессов и необходимость их регулирования для устойчивого функционирования предохранительной подушки. Для различных значений толщины предохранительной подушки рассчитаны необходимые значения депрессии воздуха между верхней и нижней отметками, исключающие накопление льда в пустотах горных пород. Утверждается, что одним из способов стабилизации подвижности и фильтрационных свойств предохранительной подушки при отрицательных температурах среды и пород может быть ее искусственное засоление природными высокоминерализованными водами подмерзлотных горизонтов месторождения. Приведены примеры расчета депрессии воздуха при различных температурах фазовых переходов влаги и значениях толщин предохранительной подушки.

Ключевые слова: подземная доработка, отработанный карьер, предохранительная подушка, криолитозона, фазовые превращения влаги, льдистость, температура, депрессия.

Для цитирования: *Хохолов Ю. А.* Особенности процессов тепло-и массообмена, происходящих в предохранительной подушке при подземной доработке подкарьерных запасов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 2. – С. 13–21. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-13-21.

Features of heat- and mass-exchange in a safety cushion in mining under open pit bottom

Yu.A. Khokholov

Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, e-mail: khokholov@igds.ysn.ru

© Ю.А. Хохолов. 2020.

Abstract: The article presents the mathematical model data and features of heat- and mass-exchange processes in a safety cushion filled on the bottom of an open pit. These features govern mobility and permeability of the cushion during mining of kimberlite pipe reserves under the pit bottom using the systems with caving. The temperature and moisture content (ice content) distributions in depth of the safety cushion are given for different values of the depression (pressure difference) at the upper and lower boundaries of the cushion in the conditions of upward flow of warm mine air. The critical role of the heat- and mass-exchange processes and their control towards the safety cushion stability is emphasized. For different thicknesses of the safety cushion, the depression values required to eliminate ice accumulation in voids are calculated. It is stated that one of the methods to stabilize mobility and permeability of the safety cushion under negative temperatures of the ambient medium and rocks can be its artificial salinification with natural subpermafrost high-salt water. The calculated examples of air depression at different temperatures of phase transitions of water and at various thickness of the safety cushion are presented.

Key words: underground mining, mined-out open pit, safety cushion, permafrost zone, phase transitions of water, ice content, temperature, depression.

For citation: Khokholov Yu. A. Features of heat- and mass-exchange in a safety cushion in mining under open pit bottom. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(2):13-21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-13-21.

Введение

Для подземной отработки подкарьерных запасов алмазосодержащей трубки «Удачная» АК «АЛРОСА» принята система этажного обрушения с одностадийной выемкой под породной предохранительной подушкой (ПП), имеющей многофункциональное назначение и возводимой на дне отработанного карьера в виде навала значительной мощности из хорошо проницаемых геоматериалов, который к началу эксплуатации рудника может иметь как положительный, так и отрицательный температурный режим в зависимости от сезона возведения —зимний или летний [1—5].

Одним из основных требований, предъявляемым к ПП, является поддержание ее круглогодичной подвижности, что в значительной степени обеспечивается положительным температурным режимом, который создается восходящим потоком фильтруемого через всю толщу вентиляционного воздуха, подогреваемого в зимний период калориферами до положительной температуры ($t \geq 2$ °С). При этом рудничной вентиляционной установкой должен быть обеспечен требуемый уровень депрессии (разности давлений) между нижней и верхней границами ПП.

Необходимо отметить, что тепловой режим ПП формируется под влиянием множества факторов, имеет сложный характер и недостаточно изучен по целому ряду причин. Необходимость его регулирования является неоспоримым постулатом, во многом определяющим подвижность ПП, ритмичность работы рудника, эффективность и безопасность ведения горных работ.

При отрицательном температурном режиме ПП, при движении восходящего потока теплого воздуха через слой мерзлых пород будут неизбежно происходить конденсационные процессы с выпадением влаги на породных отдельностях, их смерзанием и образованием конгломератов, что может нарушить равномерность опускания подушки, чего нельзя допускать. Кроме этого, термовлажностное состояние ПП и интенсивность процессов льдообразования во многом зависят от растепляющего воздействия дождевых осадков в летний период и поступления вод во время таяния снега,

накопленного за зиму, а также годового хода температур атмосферного воздуха.

Методы

В технической литературе отсутствуют зарубежные аналоги отработки подкарьерных запасов трубки в условиях криолитозоны, а так же данные о опытно-экспериментальных работах по изучению особенностей функционирования ПП на горных предприятиях. Поэтому для обоснования выбора рациональных технических решений необходимо проведение большого объема исследований на математических и физических моделях. Известны различные математические модели для расчета температурных условий в мерзлых горных породах. В основном применяют уравнения теплопроводности без учета фильтрации влаги [6]. Однако в последнее время предложены модели, учитывающие пленочное движение влаги [7], фильтрацию воды [8—11] и диффузию влажного воздуха [10—12].

За основу разрабатываемой математической модели взяты апробированные модели тепло- и массопереноса в пористой среде, основанные на фундаментальных законах термодинамики и гидродинамики. С учетом протекающих тепломассобменных процессов, происходящих в предохранительной подушке, для выявления особенностей формирования термовлажностного режима были разработаны математические модели с одновременным учетом тепловых и фильтрационных процессов [13—15].

При разработке общей математической модели тепло- и массопереноса учтены три взаимовлияющие процесса, которые происходят в ПП: фильтрация жидкой влаги, фильтрация влажного воздуха и теплоперенос с фазовыми переходами влаги. Каждый из этих процессов описывается отдельной системой дифференциальных уравнений в частных производных. Для описания процессов инфильтрации влаги и фильтрации воздуха через ПП использована система уравнений тепло- и массопереноса при следующих основных предположениях: температура влаги и скелета породы одинакова; температура влажного воздуха в порах и пустотах ПП рассчитывается отдельно; перенос жидкой влаги осуществляется только в жидкой фазе под действием силы тяжести и потенциала влаги; фильтрации влаги и воздуха происходят по закону Дарси. Учитывается уменьшение коэффициента проницаемости ПП при заполнении пор пород жидкой влагой и льдом. Рассматривается одномерная задача, причем начало отсчета совпадает с поверхностью подушки, при этом ось направлена вертикально вниз.

С использованием разработанных моделей были сделаны новые прогнозные расчеты динамики изменений температуры, влажности (льдистости) ПП, возведенной в виде навала из хорошо проницаемых вскрышных пород, с учетом вышеперечисленных факторов при различных значениях депрессии по истечении 1÷4 лет ее эксплуатации в период работы рудника.

Результаты

В качестве примера была рассмотрена ПП толщиной 30 м, которая соответствует горизонту –365 м рудника «Удачный». Расчеты проводились при следующих исходных данных: начальная температура ПП –4 °С; пористость (пустотность) 0,3; температура восходящего рудничного воздуха +2 °С; значения депрессии 60 ДПа и 100 ДПа. Источниками разности давлений на верхней и нижней границах ПП могут быть общерудничная депрессия, создаваемая вентиляторами, естественная тяга и т.д. Среднегодовая норма осадков была принята равной 326 мм, при максимуме в июле (59 мм) и минимуме в феврале (9 мм).

Также в расчетах учитывалось поступление весенних вод в отработанный карьер за счет таяния накопленного за зимний период снега.

На рис. 1—4 приведены расчетные распределения льдистости и температуры в ПП по истечении 1, 2, 3 и 4 лет эксплуатации.

Как видно из графиков, при поступлении вод атмосферных осадков и растаявшего снега в летний период в верхней части ПП происходит постепенное накопление льда в порах и пустотах горных пород за счет аккумулированного ими холода. В частности, при депресси 60 ДПа это приводит к закупорке пустот через 1 год эксплуатации ПП на глубине 1,1 м, а через три года характерный «горб» передвигается на глубину 1,4 м, и по истечении четырех лет он сохраняется на той же глубине (рис. 1).

В нижней части ПП происходит постепенное повышение температуры пород за счет восходящей фильтрации теплого воздуха из рудника, независимо от времени года. При этом также происходит накопление льда в ПП за счет конденсации влаги из влажного рудничного воздуха. Кривая льдосодержания также имеет характерный «горб», который с течением времени перемещается к верхней границе ПП (рис. 2).

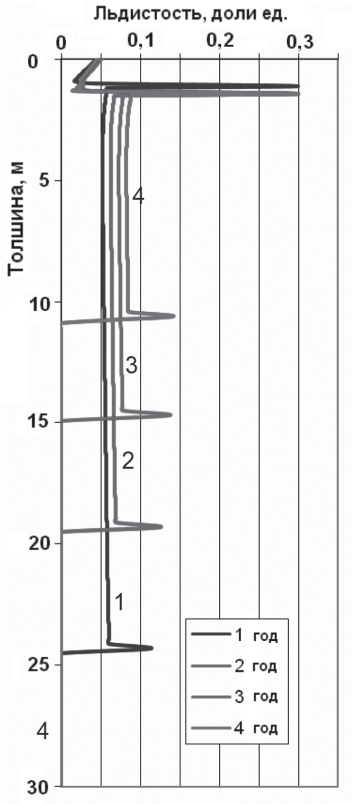

Рис. 1. Распределения льдистости по глубине породной подушки в разные периоды ее эксплуатации при депрессии 60 ДПа

Fig. 1. Distribution of ice content in depth of safety cushion in its different operation periods under depression of 60 dPa

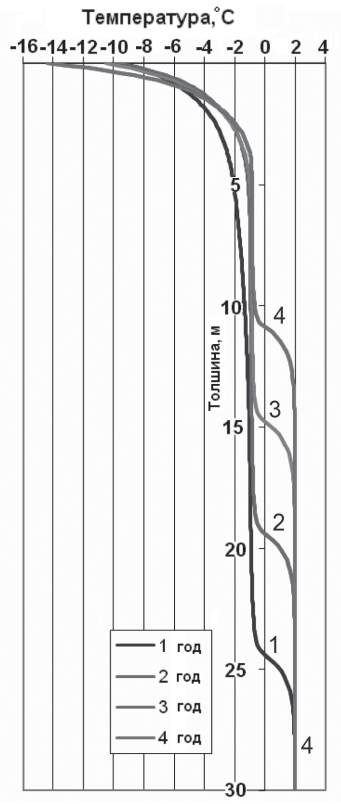

Рис. 2. Распределения температур по глубине породной подушки в разные периоды ее эксплуатации при депрессии 60 ДПа

Fig. 2. Distribution of temperature in depth of safety cushion in its different operation periods under depression of 60 dPa

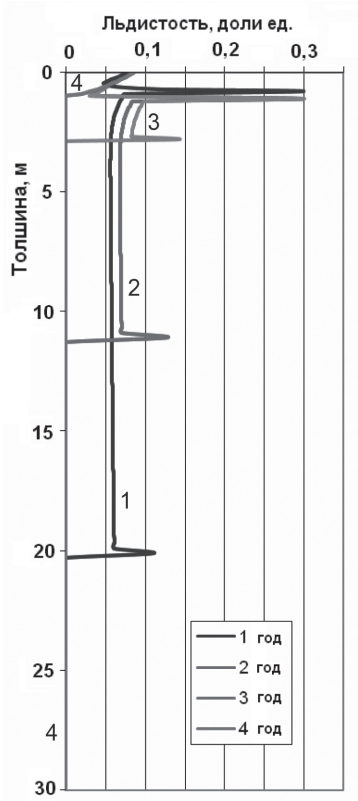

Рис. 3. Распределения льдистости по глубине породной подушки в разные периоды ее эксплуатации при депрессии 100 ДПа

Fig. 3. Distribution of ice content in depth of safety cushion in its different operation periods under depression of 100 dPa

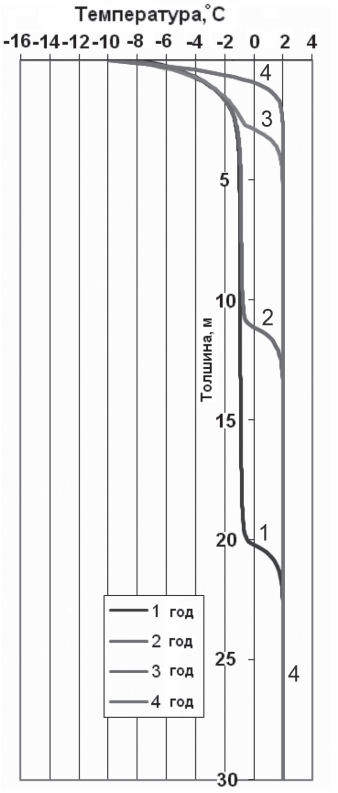

Рис. 4. Распределения температур по глубине породной подушки в разные периоды ее эксплуатации при депрессии 100 ДПа

Fig. 4. Distribution of temperature in depth of safety cushion in its different operation periods under depression of 100 dPa

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчетов льдистости и температуры ПП при депрессии 100 ДПа, из которых видно, что к 4 году эксплуатации в ее верхней части льдосодержание не превышает 6,2%, т.е. исключается закупорка пор и пустот льдом, что снижает вероятность смерзания породных кусков. При этом отчетливо видно, что процесс передвижения «горба» снизу вверх более интенсивный из-за повышения скорости фильтрации влажного рудничного воздуха.

Были также рассчитаны (табл. 1) требуемые депрессии воздуха для различных значений толщин ПП, при которых возможно предотвратить закупорку льдом

Таблица 1

Значения депрессий (разности давлений) воздуха между верхней и нижней отметками ПП, исключающие накопление льда в пустотах породного навала
Depression values (pressure differences) between the upper and lower boundaries of safety cushion, eliminating ice accumulation in voids

Толщина ПП, м	30	35	45	65
Депрессия, ДПа	80	120	140	240

Таблица 2

Значения депрессии (разности давлений) воздуха между верхней и нижней отметками ПП, исключающие накопление льда в пустотах пород, при разных температурах фазовых переходов влаги

Depression values (pressure differences) between the upper and lower boundaries of safety cushion, eliminating ice accumulation in voids at different temperatures of phase transitions of water

Толщина ПП, м	30	35	45	65
Депрессия при $T_ф$ = 0 °С, ДПа	80	120	140	240
Депрессия при $T_ф$ = –1 °С, ДПа	70	100	120	200
Депрессия при $T_ф$ = –2 °С, ДПа	60	80	100	120

пустот в верхней ее части за счет поступления атмосферных осадков.

Для предотвращения льдонакопления и повышения фильтрационной способности ПП возможно применение искусственного засоления геоматериала ПП, для этого могут быть использованы природные высокоминерализованные воды. При этом температура начала замерзания влаги сдвигается на 1—2 °С. В табл. 2 приведены расчетные значения депрессии (разности давлений) воздуха между верхней и нижней отметками ПП, при которых возможно предотвращение накопление льда в пустотах пород, при различных температурах фазовых переходов влаги.

Обсуждение результатов

Данные табл. 1 свидетельствуют, что с увеличением толщины ПП (она непрерывно возрастает в результате падающих с бортов карьера пород) требуется прогрессирующее увеличение депрессий, что должно быть учтено при выборе рудничного вентилятора.

Как видно из табл. 2, искусственное засоление геоматериала ПП позволяет повысить ее фильтрационную способность, и, как следствие, уменьшить необходимую депрессию по сравнению с подушкой, содержащей пресную влагу, что позволит снизить производительность вентиляторной установки.

Необходимо отметить, что со временем геоматериал ПП при ее передвижении будет неизбежно механически истираться с появлением мелких фракций, а также не исключается его слеживание, особенно при увлажнении. Все это может привести к снижению фильтрационных характеристик ПП. Для выяснения этого обстоятельства, были дополнительно проведены аналогичные расчеты для проницаемого и слабопроницаемого навала горных пород при толщине ПП 30 м. Полученные результаты свидетельствуют, что депрессии, позволяющие предотвратить накопление льда в пустотах пород, для проницаемого навала пород составляют 320 ДПа, а для слабопроницаемого –360 ДПа. Таким образом, требуется существенное повышение значения депрессии при снижении коэффициента фильтрации ПП по сравнению с хорошо проницаемыми породами (80 ДПа). Это обстоятельство также должно быть учтено при выборе рудничного вентилятора.

Заключение

1. В весенне-летний период при поступлении вод атмосферных осадков и растаявшего снега в ПП в ее верхней части происходит постепенное накопление льда в порах и пустотах навала мерзлых горных пород за счет аккумулированного ими за зимний период холода. В нижней части подушки происходит постепенное повышение температуры пород за счет восходящей фильтрации теплого воздуха из рудника, независимо от времени года. При этом также проис-

ходит накопление льда в ПП за счет конденсации влаги из влажного рудничного воздуха, кривая льдосодержания имеет характерный «горб», который с увеличением срока эксплуатации перемещается к ее верхней границе.

2. Требуемые значения депрессий (разности давлений) воздуха между верхней и нижней отметками ПП, при которых возможно предотвратить накопление льда в пустотах пород, в значительной степени определяются ее фильтрационной способностью. Выявлено, что с увеличением количества мелких фракций пород в ПП и, как следствие этого, снижения ее фильтрационной способности, требуется существенное повышение депрессии во избежание льдонакопления.

3. Искусственное засоление геоматериала ПП позволяет стабилизировать ее фильтрационные свойства и, как следствие, существенно снизить величину необходимой депрессии по сравнению с породным навалом, содержащим пресную влагу.

Результаты математического моделирования и расчетов по разработанным программам могут быть полезны и найдут применение при ведении проектных работ и возведении ПП, а также контроля за ее температурным режимом, фильтрационными свойствами, подвижностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Колганов В. Ф., Акишев А. Н., Дроздов А. В.* Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. — Мирный: Мирнинская городская типография, 2013. — 568 с.

2. *Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Кульминский А. С.* Отработка подкарьерных запасов трубки «Удачная» в сложных климатических, горно- и гидрогеологических условиях // Горный журнал. — 2011. — № 1. — С. 63—66.

3. *Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Никитин И. В., Тишков М. В.* Обоснование толщины предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов трубки «Удачная» системами с обрушением // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 2. — С. 52—62.

4. *Шубин Г. В., Заровняев Б. Н., Курилко А. С., Дмитриев А. А.* Технологические свойства руд и вмещающих пород Удачнинского месторождения. — Новосибирск: Наука, 2017. — 160 с.

5. *Коваленко А. А., Тишков М. В.* Оценка подземного способа отработки месторождения трубки «Удачная» с применением системы с самообрушением // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 4. — С. 117—128.

6. *Kurylyk B. L., MacQuarrie K. T. B., McKenzie J. M.* Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold and temperate regions: implications, mathematical theory, and emerging simulation tools // Earth-Science Reviews, 2014, vol. 138, pp. 313—334. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.06.006.

7. *Karra S., Painters S. L., Lichtner P. C.* Three-phase numerical model for subsurface hydrology in permafrost-affected regions (PROTRAN-ICE v.1.0) // The Cryosphere. 2014, vol. 8, pp. 1935—1950. DOI: 10.5194/tc-8-1935-2014.

8. *Wu M., Jansson P.-E., Tan X., Wu J., Huang J.* Constraining parameter uncertainty in simulations of water and heat dynamics in seasonally frozen soil using limited observed data // Water. 2016, vol. 8(2), pp. 64. DOI: 10.3390/w8020064.

9. *Sjöberg Y., Coon E., Sannel A. B. K., Pannetier R., Harp D., Frampton A., Painter S. L., Lyon S. W.* Thermal effects of groundwater flow through subarctic fens: a case study based on field observations and numerical modeling // Water Resources Research. 2016, vol. 52, no 3, pp. 1591—1603. DOI: 10.1002/2015WR017571.

10. *Painter S. L.* Three-phase numerical model of water migration in partially frozen geological media: model formulation, validation, and applications // Computational Geosciences. 2011, vol. 15, pp. 69—85.

11. *Zhou Y., Zhou G.* Numerical simulation of coupled heat-fluid transport in freezing soils using finite volume method // Heat and Mass Transfer. 2010, vol. 46, no 8, pp. 989—998. DOI: 10.1007/s00231-010-0642-2.

12. *Голубев В.Н., Фролов Д.М.* Особенности миграции водяного пара на границах раздела атмосфера—снежный покров и снежный покров—подстилающий грунт // Криосфера Земли. — 2015. — Т. XIX. — № 1. — С. 22—29.

13. *Заровняев Б.Н., Шубин Г.В., Курилко А.С., Хохолов Ю.А.* Прогноз температурно-влажностного состояния предохранительной подушки при отработке подкарьерных запасов руды в условиях криолитозоны // Горный журнал. — 2016. — № 9. — С. 33—36.

14. *Неустроев А.П., Хохолов Ю.А.* Влияние инфильтрации атмосферных осадков на температурно-влажностный режим породной подушки в условиях Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — СВ 24 Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр Севера. — С. 310—318.

15. *Неустроев А.П., Хохолов Ю.А.* Учет инфильтрации атмосферных осадков и фильтрации влажного рудничного воздуха при накоплении льда в слое породной предохранительной подушки в условиях криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 12. — С. 39—47. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-39-47. ГИАБ

REFERENCES

1. Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. *Gorno-geologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdeniy almazov Yakutii* [Mining and geological features of radical deposits of diamonds in Yakutia], Mirnyy, Mirninskaya gorodskaya tipografiya, 2013, 568 p.

2. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Kul'minskiy A.S. Development of sub-quarry reserves of the Udachnaya pipe in difficult climatic, mountain, and hydrogeological conditions. *Gornyy zhurnal*. 2011, no 1, pp. 63—66.

3. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Tishkov M.V. Justification of the thickness of the safety cushion when working out the quarry reserves of the Udachnaya pipe with collapse systems. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2018, no 2, pp. 52—62.

4. Shubin G.V., Zarovnyaev B.N., Kurilko A.S., Dmitriev A.A. *Tekhnologicheskie svoystva rud i vmeshchayushchikh porod Udachninskogo mestorozhdeniya* [Technological properties of ores and host rocks of the Udachninsky deposit], Novosibirsk, Nauka, 2017, 160 p.

5. Kovalenko A.A., Tishkov M.V. Evaluation of the Udachnaya pipe deposit underground mining using caving system. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 4, pp. 117—128.

6. Kurylyk B.L., MacQuarrie K.T.B., McKenzie J.M. Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold and temperate regions: implications, mathematical theory, and emerging simulation tools. *Earth-Science Reviews*, 2014, vol. 138, pp. 313—334. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.06.006.

7. Karra S., Painters S.L., Lichtner P.C. Three-phase numerical model for subsurface hydrology in permafrost-affected regions (PROTRAN-ICE v.1.0). *The Cryosphere*. 2014, vol. 8, pp. 1935—1950. DOI: 10.5194/tc-8-1935-2014.

8. Wu M., Jansson P.-E., Tan X., Wu J., Huang J. Constraining parameter uncertainty in simulations of water and heat dynamics in seasonally frozen soil using limited observed data. *Water*. 2016, vol. 8(2), pp. 64. DOI: 10.3390/w8020064.

9. Sjöberg Y., Coon E., Sannel A.B.K., Pannetier R., Harp D., Frampton A., Painter S.L., Lyon S.W. Thermal effects of groundwater flow through subarctic fens: a case study based on field observations and numerical modeling. *Water Resources Research*. 2016, vol. 52, no 3, pp. 1591—1603. DOI: 10.1002/2015WR017571.

10. Painter S.L. Three-phase numerical model of water migration in partially frozen geological media: model formulation, validation, and applications. *Computational Geosciences*. 2011, vol. 15, pp. 69—85.

11. Zhou Y., Zhou G. Numerical simulation of coupled heat-fluid transport in freezing soils using finite volume method. *Heat and Mass Transfer*. 2010, vol. 46, no 8, pp. 989—998. DOI: 10.1007/s00231-010-0642-2.

12. Golubev V.N., Frolov D.M. Peculiarities of water vapor migration at the atmosphere —snow cover and snow cover —underlying soil interface. *Kriosfera Zemli*. 2015. Vol. XIX, no 1, pp. 22—29.

13. Zarovnyaev B.N., Shubin G.V., Kurilko A.S., Khokholov Yu.A. Forecast of the temperature and humidity state of the safety cushion during mining of quarry ore reserves in the permafrost zone. *Gornyy zhurnal*. 2016, no 9, pp. 33—36.

14. Neustroev A. P., Khokholov Yu. A. Influence of atmospheric precipitation infiltration on the temperature and humidity regime of the rock pillow under the conditions of the North. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, Special edition 24, pp. 310—318.

15. Neustroev A. P., Khokholov Yu. A. Ice accumulation in rock safety cushion, considering atmospheric precipitation seepage and moist mine air leak in the conditions of permafrost region. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 12, pp. 39—47. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-39-47. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Хохолов Юрий Аркадьевич — д-р техн. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: khokholov@igds.ysn.ru,
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yu.A. Khokholov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, e-mail: khokholov@igds.ysn.ru,
Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
677018, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia.

Получена редакцией 01.11.2019; получена после рецензии 18.11.2019; принята к печати 20.01.2020.
Received by the editors 01.11.2019; received after the review 18.11.2019; accepted for printing 20.01.2020.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ЭФФЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

(2019, № 12, СВ 43, 28 с.)

Жевнеров Владимир Алексеевич[1] — канд. техн. наук, доцент, e-mail: jewn@mail.ru,
Шкундин Семен Захарович[1] — д-р техн. наук, зав. кафедрой,
[1] НИТУ «МИСиС».

Особенностью горнодобывающих предприятий является наличие производственных и технологических процессов, представимых в виде движения разнообразных видов потоков. Для описания процессов функционирования таких производств применяются модели потоковых систем. Количественное описание основных показателей качества функционирования систем предложено производить на основе метода операторных уравнений. Показана более высокая эффективность применения этого метода по сравнению с другими. Особенности применения предлагаемого подхода показаны на примере модели описания процесса функционирования системы воздухораспределения в шахте. Модели такого вида могут использоваться для предварительной диагностики нарушений штатного режима выполнения производственных процессов способом решения обратной задачи — оценки степени изменения технических параметров по вариации контролируемых значений критериев качества функционирования системы.

EFFECTIVE APPROACH TO ANALYTICAL MODELING OF PRODUCTION PROCESSES OF MINING ENTERPRISES

V.A. Zhevnerov[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, *S.Z. Shkundin*[1], Dr. Sci. (Eng.), Head of Chair,
[1] National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

A feature of mining enterprises is the presence of basic production and technological processes that are represented as the movement of various types of flows. Therefore, models of flow systems are used to describe the processes of functioning of such industries. The quantitative description of the main indicators of the quality of functioning of such systems is proposed on the basis of the original method of operator equations. Specific examples show a higher efficiency of this method in comparison with known approaches. The main features of the proposed approach are shown on the example of a model describing the process of functioning of the air distribution system in the mine. Models of this type can also be used for preliminary diagnostics of violations of the normal mode of performance of production processes by solving the inverse problem-assessing.