ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2):86-100
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.4 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_86

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ

И.Р. Фазылов[1], С.Г. Гендлер[1], Е.А. Прохорова[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: FazylovIR@mail.ru

Аннотация: Исследована проблема формирования отрицательных или положительных термических аномалий в условиях горных выработок. Рассмотрены примеры возникновения искусственных термических аномалий, выполнена их классификация по характеру воздействия на рудничный воздух (нагревающее или охлаждающее). На основе вышесказанного предложена физическая модель формирования температурных полей в горном массиве, окружающем горные выработки, при нагреве или охлаждении его части, после чего дана методика расчета температуры воздуха, позволяющая учитывать теплофизические особенности формирования теплового режима горных выработок. Более подробно рассмотрены условия формирования теплового режима горных выработок в условиях нефтяных шахт, выполнена классификация факторов, определяющих тепловой режим выработок, отдельно выделены специфические источники теплоты, характерные для термошахтного способа добычи. На основе результатов натурных исследований получены закономерности изменения температуры поверхностей горных выработок буровых галерей. В дифференциальном уравнении теплового баланса дополнен механизм учета теплопоступлений, заложенный в коэффициенты A, B и g, которые зависят от показателей, определяющих теплообмен в системе «рудничный воздух, неоднородный породный массив, нефтесодержащая жидкость в лотках и поступающая из горного массива влага». Предлагаемая методика верифицирована путем сопоставления результатов натурных исследований теплового режима горных выработок и результатов расчета.

Ключевые слова: тепловой режим, тепловыделения, нагревающий микроклимат, тепловой баланс, нефтепровод, вентиляция, вентиляционная скважина, температура воздуха, климатические параметры.

Для цитирования: *Фазылов И. Р., Гендлер С. Г., Прохорова Е. А.* Особенности тепловых расчетов горных выработок в условиях искусственных температурных аномалий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 86–100. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_86.

Peculiarities of thermal design of mine openings in case of induced temperature anomalies

I.R. Fazylov[1], S.G. Gendler[1], E.A. Prokhorova[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: FazylovIR@mail.ru

Abstract: The article discusses generation of negative and positive thermal anomalies in mine openings. Some case histories of induced thermal anomalies are discussed, and their classification is carried out based on their effect on mine air (heating or cooling). On this basis, a physical model of generation of temperature fields in surrounding rock mass enclosing mine openings in case of heating or cooling of a part of the rock mass is proposed, and the air temperature calculation procedure, which allows taking into account thermophysical peculiarities of formation of thermal conditions in mine openings, is described. The details of generation of thermal conditions in oil mines are given, the influence factors of thermal conditions are classified, and heat sources typical of shaft mining with thermal stimulation for oil recovery are identified. On the basis of the full-scale study results, the temperature variation patterns on surfaces of drilling galleries are obtained. The differential equation of heat balance is added with the heat generation mechanism in terms of the coefficients *A*, *B* and *g* dependent on the features of heat exchange in the system composed of mine air, inhomogeneous rock mass, oil-containing water in pans and moisture coming from rock mass. The proposed procedure is verified through the comparison of the calculation results with the full-scale studies of thermal conditions in mine openings.

Key words: thermal conditions, heat generation, heating microclimate, heat balance, oil pipeline, ventilation, ventilation hole, air temperature, climatic parameters.

For citation: Fazylov I. R., Gendler S. G., Prokhorova E. A. Peculiarities of thermal design of mine openings in case of induced temperature anomalies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2):86-100. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_86.

Введение

Рост глубины горных работ, характерный для мировой горнодобывающей промышленности, становится заметным в Российской Федерации и на постсоветском пространстве. На предприятиях компаний «ГМК «Норильский никель», «Еврохим», «УГМК-Холдинг», «Беларуськалий» и др. разрабатываются залежи полезных ископаемых, находящиеся на глубине до 2 км, с высокой температурой окружающего массива горных пород, достигающей 40—50 °С [1—3] (табл. 1).

Повышение температуры горных пород одновременно с увеличением интенсивности добычи полезного ископаемого, использования мощного погрузочно-доставочного оборудования, появление дополнительных источников теплоты и влаги, связанных с применением систем разработки с твердеющей закладкой или термическим воздействием на разрабатываемое полезное ископаемое, влияют на характер формирования термовлажностного режима и приводят к росту температуры рудничного воздуха до значений, превышающих регламентируемую правилами безопасности величину 26 °С, что не только оказывает негативное влияние на здоровье горнорабочих, но и снижает эксплуатационные характеристики машин и механизмов [4].

Возможности нормализации климатических условий за счет увеличения количества воздуха, подаваемого в выработки, ограничены энергетическими и стоимостными затратами на вентиляцию, а применение систем кондиционирования сдерживается отсутствием эффективного отечественного холодильного оборудования, способного эффективно работать в подземных условиях.

Таблица 1

Геотермические условия некоторых шахт и рудников, расположенных на территории России [3]
Geothermal conditions of some mines and mines located in Russia [3]

№	Название шахты/рудника	Регион	Глубина ведения работ, м	Температура пород, °С
1	Рудник Скалистый	г. Норильск	2056	49
2	Рудник Таймырский	г. Норильск	1532	>35
3	Шахтерская-Глубокая	Донбасс	1546	>42
4	Гвардейская	Донбасс	1430	>42
5	Прогресс	Донбасс	1340	>42
6	Комсомольская	г. Воркута	1100	30
7	Черемуховская-Глубокая	Североуральск	1550	>35
8	Ново-Кальинская	Североуральск	1243	>35
9	Омолон	Магаданская обл.	>1000	40
10	Приаргунское	Респ. Бурятия	>1000	40
11	Учалинско-Тагильский	Свердловская обл.	>1000	45

Таким образом, повышаются требования к адекватности и точности осуществления расчетов термодинамических параметров рудничного воздуха, результаты которых должны использоваться для выбора рационального комплекса мероприятий по регулированию теплового режима горных выработок [5]. Используемые для прогноза теплового режима методы расчетов должны учитывать закономерности динамики температурных и влажностных полей в окружающем выработки горном массиве при сочетанном взаимодействии температур и влажностей пород в естественных условиях с источниками теплоты и влаги, определяемыми технологией производства горных работ [6 — 8].

Между тем, в существующих методах тепловых расчетов горных выработок отсутствует научно обоснованная оценка влияния неоднородного температурного поля на температуру поверхностей обнажения горных выработок, расположенных в зоне влияния источников теплоты, природа которых связана с технологией горных работ [9]. В статье рассматривается температурное поле в горных породах, значения которого отклоняются от фоновых величин, определяемых геотермическим градиентом, характерным для рассматриваемого района расположения месторождения, так называемого нормального или фонового геотемпературного поля. Повышение температуры пород относительно ее фонового значения следует считать положительной термоаномалией. И наоборот, снижение температуры пород относительно ее фонового значения является отрицательной термоаномалией. Очевидно, что закономерности влияния положительной и отрицательной термоаномалий на термодинамические параметры воздуха различны.

В данной статье делается попытка сформулировать общие закономерности формирования неоднородного температурного поля, связанного с воздействием положительных и отрицательных температурных аномалий, на термовлажностные параметры рудничного воз-

духа и продемонстрировать их использование на примере нефтяных шахт.

Постановка задачи

Разнообразные методы управления устойчивостью горных массивов при системах разработки с частичной или полной закладкой выработанного пространства, дренаж метана из угольных пластов, термическое воздействие на разрабатываемое полезное ископаемое приводят к возникновению положительных и отрицательных температурных аномалий (рис. 1).

Их взаимодействие с температурным полем, определяемым геотермическими условиями районов расположения месторождений полезных ископаемых, а также природными температурными аномалиями, например, водоносными горизонтами термальных вод или вод с температурой более низкой, чем температура окружающих пород, инициирует появление новых источников теплоты (гидратация бетона при твердении бетонной закладки, пар, закачиваемый в нефтяной пласт, транспортируемая по водоотводным лоткам нефтесодержащая продукция) и холода (дренаж метана, сопровождающийся снижением температуры угольного пласта и прилегающих пород, гидравлическая закладка или ледо-породная закладка, искусственное замораживание закладочного материала) приводит к формированию новых температурных распределений вокруг горных выработок, повышающих или понижающих температуры их поверхностей, контактирующих с воздухом, интенсифицирующих тепловыделение при окислении в случае складирования угля или руды в отвалах и рудоспусках или от горного массива при поступлении горячей воды или пара из нефтяного пласта в выработки [9—11].

Превалирующим процессом при формировании температурного поля в породах во всех этих случаях следует считать кондуктивный теплообмен локального объема прогреваемого или охлаждаемого горного массива (закладочного материала, рудной залежи, угольного или нефтяного пласта) с его остальной частью, в которой проходятся выработки [12]. Упрощенная физическая модель формирования положительных или отрицательных температурных аномалий показана на рис. 2.

В результате кондуктивного теплообмена вокруг выработок формируется

Рис. 1. Классификация термических аномалий по характеру воздействия [составлено авторами]
Fig. 1. Classification of thermal anomalies by the nature of the impact [compiled by the authors]

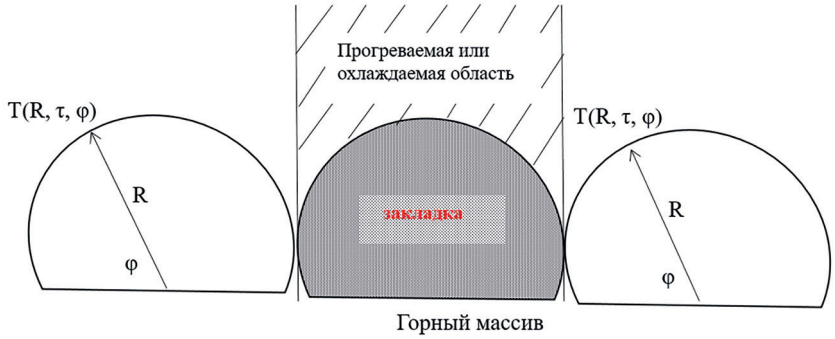

Рис. 2. Физическая модель формирования температурных полей в горном массиве, окружающем выработки, при нагреве или охлаждении его части [составлено авторами]

Fig. 2. Physical model of the formation of temperature fields in the mountain range surrounding the workings when part of it is heated or cooled [compiled by the authors]

температурное поле, обуславливающее различные температуры поверхностей обнажения выработок T (R, τ, φ), находящихся в зонах влияния прогреваемых или охлаждаемых участков массива.

Например, при использовании твердеющей закладки в начальный период времени температура горного массива в слоях, прилегающих к твердеющей закладке, несколько снижается [13, 14].

Однако с течением времени вследствие выделения теплоты гидратации (7—10 сут.) температура закладочного массива интенсивно повышается. Одновременно с этим растет и температура приконтурных зон в горном массиве на расстоянии 1,0—1,5 м. После завершения периодов гидратации закладки и стабилизации температуры в центральной части закладочного массива (20—30 сут.) начинается монотонное снижение температуры в закладочном массиве при ее увеличении в горном массиве. В том случае, если горная выработка шириной m проходится на расстоянии в от контакта с закладочным массивом, то поверхности ее обнажения на расстояниях от закладочного массива *в*, (*в* + *к*) и между плоскостями *в* и (*в* + *к*) будут иметь изменяющиеся во времени раз-

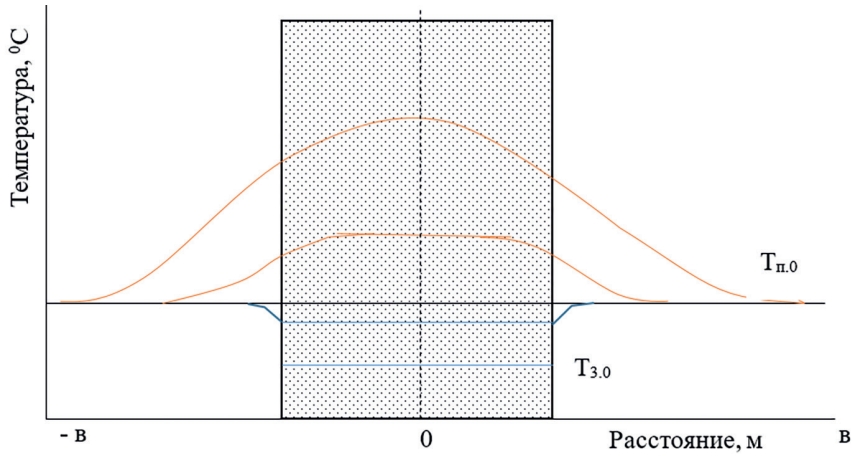

Рис. 3. Динамика формирования температурного поля в горном массиве [составлено авторами]

Fig. 3. Dynamics of the formation of the temperature field in the mountain range [compiled by the authors]

личные значения температур (рис. 3) (T_b, $T_{в+m}$, T_{b+m}). Эти температуры следует учитывать при вычислении теплового потока от горных пород в дифференциальном уравнении теплового баланса.

Другой особенностью пространственной динамики температуры рудничного воздуха, вследствие интенсификации теплообменных и влагообменных процессов при возникновении температурных аномалий и поступления влаги из горных пород, следует считать стохастический характер распределения источников влаги и их поверхности по длине выработок. Это делает невозможным использование классического метода вычисления поступления влаги как величины пропорциональной поверхности влаговыделения и коэффициента массообмена. С практической точки зрения гораздо более целесообразно применить подход, развиваемый в работах А.Н. Щербаня, В.П. Черняка, Ю.Д. Дядькина и основанный на априорном задании закона изменения относительной влажности воздуха, влагодержания или энтальпии [15, 16]. При определенных различиях у перечисленных способов имеется одно общее — все они основаны на использовании линейной интерполяции сложных зависимостей влагосодержания или энтальпии насушенного пара от температуры при условии задания линейного закона изменения относительной влажности [17—19]. В случае использования подхода, предложенного Ю.Д. Дядькиным, но при аппроксимации влагосодержания насыщенного пара $d_н$ двухчленной зависимостью вида $d_н \approx m + nt_в$ возможно получить следующее решение дифференциального уравнения теплового баланса:

$$\left(1 + gy\right)\frac{dt}{dy} = -At + B\,, \tag{1}$$

где коэффициенты A, B и g зависят от показателей, определяющих теплообмен в системе «рудничный воздух, неоднородный породный массив, нефтесодержащая жидкость в лотках и поступающая из горного массива влага»,

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{4}\left(a_{т.i}U_i\right) + k_{т.л}U_л + r_п\dfrac{760}{P}\Delta\varphi n + C_п q_п \Delta\eta(y)}{Gc_{эф}}\,, \tag{2}$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{4}\left(a_{т.i}U_i T_i\right) + k_{т.п.л}u_л\theta_{н.с.ж} - r_п\dfrac{760}{P}\Delta\varphi m + \left(C_п q_п T_п + r q_п\right)}{Gc_{эф}}\,, \tag{3}$$

$$g = \frac{760 r \Delta\varphi}{PC_{эф}}\,. \tag{4}$$

В зависимостях (1) и (2) y — продольная координата, м; t — температура воздуха, °С; $c_{эф}$ — эффективная теплоемкость, определяемая по формуле (5), Дж/(кг °С); G — весовой расход воздуха, кг/с; U — периметр обнажений горного массива со стороны источника, определяющего формирование температурной аномалии (i = = 1), кровли (i = 2), почвы (i = 3), поверхности, противоположной обнажению горного массива со стороны источника, определяющего формирование температурной аномалии (i = 4), м; $k_{т.i}$, $k_{т.п.л}$ — коэффициенты теплопередачи от воздуха

соответственно к поверхности горного массива и воды в лотке, Вт/(м^2 град.); $\theta_{н.с.ж}$ — температура воды, °С; $r_п$ — удельная теплота испарения (конденсации пара, Дж/кг; $C_п$ — теплоемкость поступающего в воздух пара, Дж/(кг °С); $\Delta\varphi$ — изменение относительной влажности на участке; $\Delta\varphi = \varphi_{j,н} - \varphi_{j,к}$; m и n — коэффициенты из аппроксимационной зависимости влагосодержания насыщенного пара от температуры, кг/кг и кг/(кг °С);

$$C_{эф} = C_p + \frac{760}{P} r \varphi_{н,j} n \qquad (5)$$

Особенности формирования термовлажностного режима в очистных выработках нефтешахт при термическом воздействии на пласт

Для идентификации особенностей формирования теплового режима в уклонных блоках нефтяных шахт выполнены натурные исследования, включающие в себя измерения факторов: температуры поверхности стенок выработки, транспортируемой нефти и воздуха, t, °С; влажности воздуха, φ, %, скорости воздуха, v, м/с, в выработках уклонных блоков (зумпф, ходок, уклон, буровая галерея, вентиляционный штрек (ВШ) и откаточный штрек (ОШ) панелей в 14 исследуемых блоках на трех нефтяных шахтах.

В период измерений в рамках одного блока действия выполнялись в схожих условиях, без осуществления специфических технологических операций, например, «продувки» скважин или иных факторов переменного действия, которые могут повлиять на результаты измерений. В точке замера обеспечивается стабильный поток воздуха.

Сечение выработки в точке выполнения измерения свободно от посторон-

Таблица 2

Температурный режим в исследуемых уклонных блоках [составлено авторами]
Temperature regime in the researched inclined blocks [compiled by the authors]

Температурный режим	Количество уклонных блоков, шт.			Итого
	шахта № 1	шахта № 2	шахта № 3	
до 26°С	2	—	—	2
от 26°С до 36°С	2	2	1	5
более 36°С	3	1	3	7
Итого	7	3	4	14

Таблица 3

Значимость тепловыделений от различных источников теплоты по мере разработки уклонного блока [составлено авторами]
The significance of heat releases from various heat sources as the development of an inclined block [compiled by the authors]

Источник теплоты	Доля тепловыделений, % (указаны значения доли тепловыделений в начале и в конце этапа)		
	1 стадия (до 3 лет)	2 стадия (3–7 лет)	3 стадия (более 7 лет)
НСЖ	100 — 50	50 — 20	20 — 0
Стенки выработок	0 — 50	50 — 40	40 — 0
Паропроявления	0	0 — 40	40 — 100

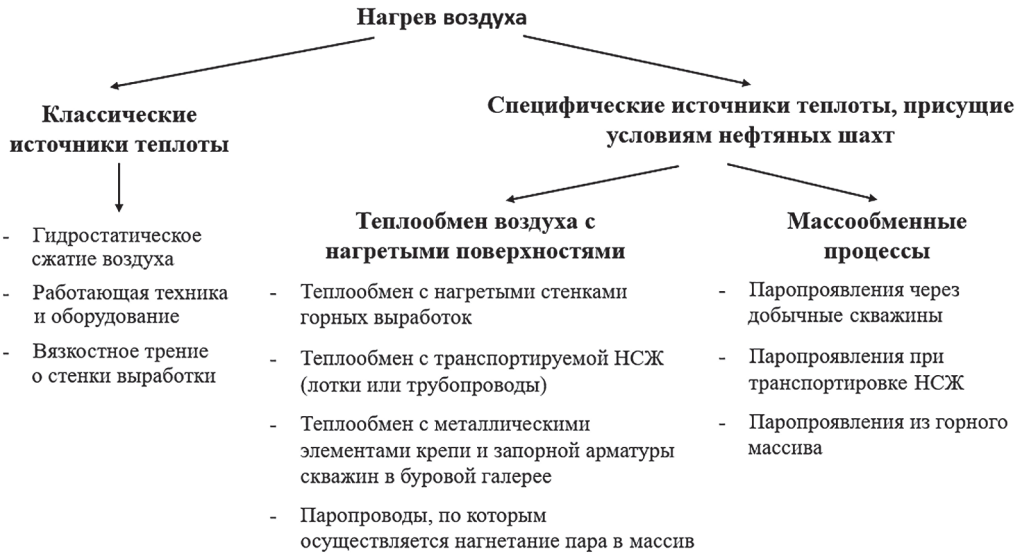

Рис. 4. Факторы, оказывающие нагревающее воздействие на рудничный воздух в условиях горных выработок нефтяных шахт [составлено авторами]
Fig. 4. Factors that have a heating effect on mine air in mining conditions in oil mines [compiled by the authors]

них элементов, создающих лобовое сопротивление.

Согласно натурным исследованиям, количество уклонных блоков с температурным режимом, превышающим 26 °С, находящимся в пределах 26 — 36 °С и превышающим 36 °С, представлено в табл. 2 [20 — 22].

Из результатов натурных исследований рассчитаны доли тепловыделений от различных источников теплоты в блоках, дифференцируемых по времени разработки (табл. 3).

Из результатов исследований теплового режима уклонных блоков идентифицированы и классифицированы факторы, оказывающие тепловое воздействие на рудничный воздух [23 — 25]. Перечень факторов, оказывающих нагревающее воздействие на воздух, представлен на рис. 4.

Из перечисленных факторов теплообмен с нагретыми стенками выработок является фактором, определяемым фильтрационными полями в прогреваемом массиве [26]. Следствием неоднородности массива и особенностей технологических условий по добыче нефти термошахтным способом является неоднородное температурное поле вокруг горных выработок уклонных блоков [27 — 29].

Для более точного определения теплового режима и возможности расчета и прогнозирования температуры воздуха в выработках предлагается дифференцировать поверхность горной выработки на 4 составляющие (почва, кровля, стенка у пласта, стенка в противоположной части пласта). На рис. 5 представлена принципиальная схема распределения источников теплоты в уклонном блоке.

$Q_{стенок}$ — теплопоступления от стенок выработки (при этом теплопоступления от различных стенок различаются), тепловой поток от кровли, почвы, «холодного» и «горячего» борта различен и определяется температурой поверхности, $Q_{нсж}$ — тепловыделения от нефтесодержащей жидкости, которая транспортируется по лоткам или почве выработки, $Q_{пара}$ — теплопоступления с

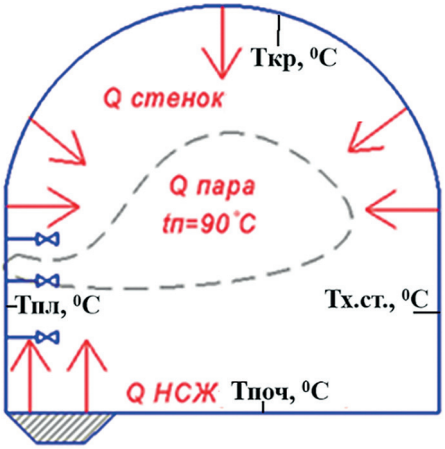

Рис. 5. Схема распределения теплоты в выработке уклонного блока [составлено авторами]

Fig. 5. Scheme of heat distribution in the development of an inclined block [compiled by the authors]

паром, который проявляется из скважин или трещин в массиве [30 — 32].

Результаты измерений температуры поверхности выработок (почвы, кровли, нефтяного пласта и «холодной» стенки) представлены на рис. 6. В общей сложности проанализировано 14 буровых галерей на трех нефтяных шахтах. Результаты обобщены по фактору времени жизни блока.

На основании обработки данных натурных измерений установлено, что средние температуры поверхностей обнажений нефтяного пласта, кровли, почвы и стенки, противоположной обнажению нефтяного пласта, определяются с достаточной для инженерных расчетов точностью (корреляционное соот-

Таблица 4

Средние температуры поверхностей обнажения горного массива, окружающего эксплуатационную галерею [составлено авторами]

Average surface temperatures of the rock outcrop surrounding the production gallery [compiled by the authors]

Поверхность выработки	Средняя температура поверхности обнажения
Нефтяной пласт	$T_{об.пл.} = 24{,}17\ln(T) + 26{,}146$
Кровля	$T_{об.кр.} = 13{,}023\ln(T) + 32{,}638$
Почва	$T_{об.пч.} = 24{,}17\ln(T) + 26{,}146$
Противоположная обнажению нефтяного пласта поверхность выработки («холодная» стенка»)	$T_{пр.ст.} = 6{,}4164\ln(T) + 18{,}2659$

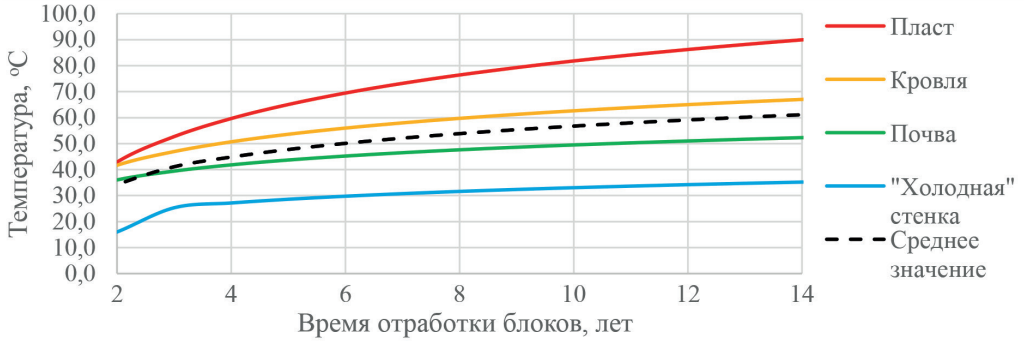

Рис. 6. Динамика температуры поверхностей буровых галерей по мере разработки уклонных блоков [составлено авторами]

Fig. 6. Temperature dynamics of the surfaces of drilling galleries as inclined blocks are developed [compiled by the authors]

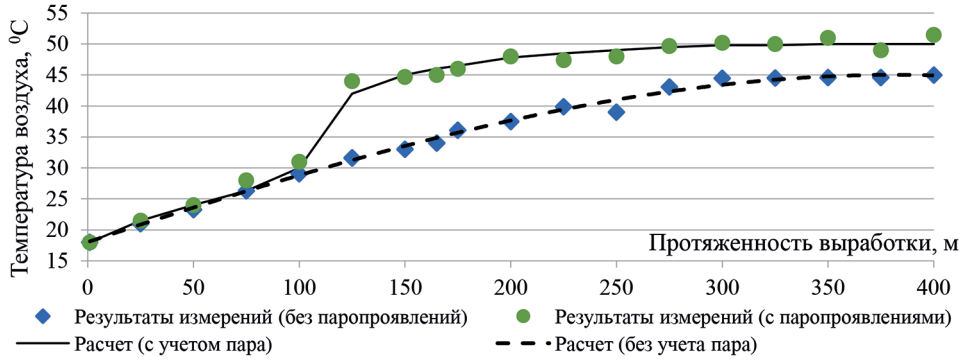

Рис. 7. Результаты верификации методики расчета для условий, характеризующихся наличием паропроявлений и их отсутствием [составлено авторами]

Fig. 7. Results of verification of the calculation methodology for conditions characterized by the presence of steam and without them [compiled by the authors]

ношение не менее 0,9) зависимостями (табл. 4).

Полученные уравнения для определения $T_{об.пл.}$, $T_{об.кр.}$, $T_{об.пч.}$, $T_{пр.ст.}$ можно учитывать в уравнении (3), описывающем приращение теплоты рудничного воздуха по пути движения в горных выработках, в котором учтены все источники теплоты.

Верификация разработанной методики осуществлена путем сопоставления расчетных значений температуры воздуха и результатов натурных измерений температуры рудничного воздуха в выработке.

Результаты верификации при наличии различных источников теплоты на исследуемом участке представлены на рис. 7.

Из графика на рис. 6 можно сделать вывод, что данные, полученные расчетным способом, и результаты измерений сходятся. Разница между измеренными и расчетными значениями температуры не превышает 3 °С, что свидетельствует об адекватности предлагаемой методики расчета температуры воздуха в условиях нефтяных шахт [33, 34].

Обязательным условием для гарантированной нормализации параметров микроклимата в выработках уклонного блока воздуха следует считать учет при выборе мероприятий по снижению температуры воздуха периодических поступлений пара в воздушную среду [35].

Заключение

1. Термические аномалии в горных выработках шахт и рудников оказывают нагревающее или охлаждающее действие на рудничный воздух. Термические аномалии могут быть причиной нагрева воздуха в следующих случаях: ведение горных работ на глубине более 1 км, наличие термальных вод в зоне ведения горных работ, применение систем разработки с использованием твердеющей закладки, разработка нефтяного месторождения термошахтным способом, использование высокоэнергетического горного электрического или дизельного оборудования.

2. В условиях нефтяных шахт, помимо традиционных источников теплоты, в горных выработках уклонных блоков присутствуют специфические источники теплоты, являющиеся различным проявлением поступления теплоты от нагнетаемого в массив теплоносителя (пара). Такими источниками являются: поступление пара из горного массива, из добычных скважин, разогретые стен-

ки горных выработок и транспортируемая нефтесодержащая жидкость.

3. Согласно натурным исследованиям, установлено, что температурный режим в массиве, окружающем горные выработки уклонного блока нефтяных шахт, неоднородный и определены закономерности изменения температуры стенок горных выработок в зависимости от времени разработки уклонного блока.

4. Разработана и верифицирована методика расчета температуры воздуха в условиях термических аномалий, в которой реализован механизм учета теплопоступлений от различных источников теплоты, включая неоднородно разогретый породный массив, транспортируемое сырье и массообменные процессы, например, поступление пара.

Разработанная методика может быть применима в условиях рудников с использованием твердеющей закладки, благодаря возможности дифференциации температуры стенок горной выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайцев А. В.*, *Семин М. А.*, *Паршаков О. С.* Особенности формирования теплового режима в воздухоподающих стволах в холодный период года // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 562—568. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.9.

2. *Семин М. А.*, *Гришин Е. Л.*, *Левин Л. Ю.*, *Зайцев А. В.* Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 623—632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.

3. *Alabyev V. R.*, *Rudakov M. L.*, *Korobitcyna M. A.* Peculiarities of heat-mass-exchange processes in faces developing steep coal seams // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2017, vol. 114, pp. 349—400. DOI: 10.12732/ijpam.v114i2.18.

4. *Фомин А. И.*, *Грунской Т. В.* Методические рекомендации по оценке риска развития профессиональных заболеваний у подземного персонала при термошахтном способе добычи высоковязкой нефти // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2019. — № 1. — С. 82—89. DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.18.99.008.

5. *Прищепа О., Халимов Э.* Трудноизвлекаемая нефть: потенциал, состояние и возможности освоения // Нефтегазовая вертикаль. — 2011. — № 5. — С. 24—29.

6. *Alabyev V. R.*, *Kruk M. N.*, *Bazhina T. P.*, *Semenov A. S.*, *Demin V. I.* Economic efficiency of the application of artificial air cooling for normalization of thermal conditions in oil mines // Scientia Iranika. Transactions E: Industrial Engineering. 2020, vol. 27, no. 3, pp. 1606—1615. DOI: 10.24200/SCI.2018.50549.1753.

7. *Galevskiy S.*, *Ponomarenko T.*, *Tsiglianu P.* The impact of self-sufficiency in basic raw materials of metallurgical companies on required return and capitalization: the case of Russia // Journal of Risk and Financial Management. 2025, vol. 18, no. 6, p. 318. DOI: 10.3390/jrfm18060318.

8. *Жихарев С. Я.*, *Цыганков В. Д.*, *Родионов В. А.*, *Исаевич А. Г.* Оптимизация процессов пылеподавления при ведении подземных горных работ на основе данных натурных экспериментов и моделирования в программе ANSYS Fluent // Горный журнал. — 2023. — Т. 11. — С. 70—75. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.11.

9. *Гендлер С. Г.*, *Фазылов И. Р.*, *Абашин А. Н.* Результаты экспериментальных исследований теплового режима нефтяных шахт при термическом способе добычи нефти // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-1. — С. 248—262. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_248.

10. *Тимонина Н. Н.*, *Пьянков В. В.* Ярегское месторождение тяжелой нефти: история разработки и перспективы развития // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. — 2018. — № 7(283). — С. 41—48. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-7-41-48.

11. *Kornev A. V.*, *Korshunov G. I.*, *Kudelas D.* Reduction of dust in the longwall faces of coal mines: problems and perspective solutions // Acta Montanistica Slovaca. 2021, vol. 26, no. 1, pp. 84—97. DOI: 10.46544/ams.v26i1.07.

12. *Сытник С. С.*, *Маринин С. Ю.* Результаты исследования состояния пожарной безопасности на нефтеперерабатывающих объектах // Научные труды КубГТУ. — 2019. — № 7. — С. 370 — 386.

13. *Шувалов Ю. В.*, *Васильев А. П.*, *Родак В. П.* Тепловой режим шахт и рудников // Уголь. — 1994. — № 2. — С. 16 — 17.

14. *Sidorenko S., Trushnikov V., Sidorenko A.* Methane emission estimation tools as a basis for sustainable underground mining of gas-bearing coal seams // Sustainability (Switzerland). 2024, vol. 16, no. 8, article 3457. DOI: 10.3390/su16083457.

15. *Дядькин Ю. Д.* Методика теплового расчета шахт и рудников в сложных условиях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1973. — № 5. — С. 92 — 100.

16. *Цхадая Н. Д.*, *Жуйков А. Е.*, *Ягубов З. Х.* Критерий оценки оптимальных условий труда в горных выработках нефтяных шахт // Нефтегазовое дело. — 2012. — № 5. — С. 318 — 325.

17. *Казаков Б. П.*, *Шалимов А. В.*, *Зайцев А. В.* Влияние процессов испарения и конденсации влаги на тепловой режим глубоких рудников // Горный журнал. — 2016. — № 3. — С. 73 — 76. DOI: 10.17580/gzh.2016.03.15.

18. *Левкин Ю. М.* Использование технологии дистанционного зондирования и математического моделирования для анализа аварийных горных выработок // Уголь. — 2022. — № 6(1155). — С. 32 — 34. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-32-34.

19. *Дуркин С. М.*, *Морозюк О. А.*, *Рузин Л. М.* Новые термошахтные технологии и оценка их эффективности путем численного моделирования // Нефть. Газ. Новации. — 2013. — № 4. — С. 45 — 51.

20. *Каледина Н. О.*, *Малашкина В. А.* Индикаторная оценка надежности функционирования шахтных вентиляционно-дегазационных систем // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 553 — 561. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8.

21. *Клюкин Ю. А.*, *Семин М. А.*, *Левин Л. Ю.* Исследование влияния способа транспортировки нефтесодержащей жидкости на микроклиматические условия в нефтяной шахте / Материалы X Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых». — Пермь, 2017. — С. 371 — 373.

22. *Левин Л. Ю.*, *Кормщиков Д. С.* Особенности добычи высоковязкой нефти на примере Ярегского месторождения // Научные исследования и инновации. — 2010. — Т. 4. — № 2. — С. 33 — 36.

23. *Колесов Е. В.*, *Казаков Б. П.*, *Кузьминых Е. Г.* Моделирование процесса изменения состава рудничного воздуха в наклонной тупиковой горной выработке // Горное эхо. — 2020. — № 1. — С. 79 — 84. DOI: 10.7242/echo.2020.1.17.

24. *Серегин А. С.*, *Ахтямов К. Д.*, *Фазылов И. Р.*, *Белехов П. А.* Влияние расположения вентиляционного трубопровода на эффективность проветривания тупиковой горной выработки при эксплуатации машин с двигателями внутреннего сгорания // Горный журнал. — 2025. — № 5. DOI: 10.17580/gzh.2025.05.09.

25. *Круглов Ю. В.* Варианты применения закрытой системы сбора нефти, работающей в автоматическом режиме, в нефтяных шахтах // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2017. — № 15. — С. 329 — 332.

26. *Калинина А. А.*, *Калинин Е. П.* Геолого-экономическая оценка комплексного использования Ярегской тяжелой нефти // Известия Коми научного центра УрО РАН. — 2013. — № 3(15). — С. 110 — 117.

27. *Галкин А. Ф.*, *Курта И. В.*, *Панков В. Ю.*, *Ильинов М. Д.* Влияние нефтяного потока на точность прогноза температуры воздуха в горных выработках // Нефтяное хозяйство. — 2020. — № 4. — С. 98 — 100. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-4-98 — 100.

28. *Мороз Н. Е.*, *Сидоров Д. В.*, *Соннов М. А.* Комплексное геомеханическое моделирование разработки жильных месторождений блочного строения // Горная промышленность. — 2023. — № 6. — С. 71 — 74. DOI: 10.30686/1609-9192- 2023-6-71-74.

29. *Козырева Е. Н.*, *Шинкевич М. В.* Особенности газогеомеханических процессов на выемочном участке шахты // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2010. — № 2. — С. 28 — 35.

30. *Гуляев В. Э.*, *Коноплев Ю. П.*, *Герасимов И. В.* Анализ технологических показателей систем термошахтной разработки Ярегского нефтяного месторождения / Проблемы разработки

и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов: Материалы межрегиональной научно-технической конференции. — Ухта: УГТУ, 2011. — С. 1218.

31. *Menter F. R.* Two-equation eddy — viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598 — 1605.

32. *Nel A. J. H.*, *Vosloo J. C.*, *Mathews M. J.* Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations // Journal of Energy in Southern Africa. 2018, vol. 29, no. 3, pp. 22 — 32.

33. *Смирняков В. В.*, *Лейсле А. В.*, *Магомет Р. Д.*, *Мухортиков С. Г.*, *Пинскер О. В.*, *Анисимов Д. О.* Экспериментальные исследования повышения эффективности работы вентиляторов местного проветривания за счет изменения частоты вращения рабочего колеса // Уголь. — 2023. — № 7(1169). — С. 59 — 67. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-7-59-67.

34. *Круглов Ю. В.* Разработка закрытой системы сбора нефти, работающей в автоматическом режиме, для условий нефтяных шахт Ярегского месторождения // Стратегия и процессы освоения георесурсов. — 2016. — № 14. — С. 294 — 297.

35. *Климова И. В.*, *Смирнов Ю. Г.*, *Родионов В. А.* Моделирование взаимосвязей между условиями труда и состоянием здоровья персонала нефтешахт с использованием нечеткой логики // Безопасность труда в промышленности. — 2022. — № 1. — С. 46 — 50. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-1-46-50. ГИАБ

REFERENCES

1. Zaitsev A. V., Semin M. A., Parshakov O. S. Features of the thermal regime formation in the downcast shafts in the cold period of the year. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 562 — 568. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.9.

2. Semin M. A., Grishin E. L., Levin L. Y., Zaitsev A. V. Automated ventilation control in mines. Challenges, state of the art, areas for improvement. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 623 — 632. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.

3. Alabyev V. R., Rudakov M. L., Korobitcyna M. A. Peculiarities of heat-mass-exchange processes in faces developing steep coal seams. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2017, vol. 114, pp. 349 — 400. DOI: 10.12732/ijpam.v114i2.18.

4. Fomin A. I., Grunskoy T. V. Methodical recommendations on the assessment of the risk of occupational diseases in underground personnel at thermal shaft method of extraction of high-viscosity oil. *Bulletin of Scientific center VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2019, no. 1, pp. 82 — 89. [In Russ]. DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.18.99.008.

5. Prishchepa O., Khalimov E. Hard-to-recover oil: Potential, condition and development opportunities. *Oil and gas vertical*. 2011, no. 5, pp. 24 — 29. [In Russ].

6. Alabyev V. R., Kruk M. N., Bazhina T. P., Semenov A. S., Demin V. I. Economic efficiency of the application of artificial air cooling for normalization of thermal conditions in oil mines. *Scientia Iranika. Transactions E: Industrial Engineering*. 2020, vol. 27, no. 3, pp. 1606 — 1615. DOI: 10.24200/SCI.2018.50549.1753.

7. Galevskiy S., Ponomarenko T., Tsiglianu P. The impact of self-sufficiency in basic raw materials of metallurgical companies on required return and capitalization: the case of Russia. *Journal of Risk and Financial Management*. 2025, vol. 18, no. 6, p. 318. DOI: 10.3390/jrfm18060318.

8. Zhikharev S. Ya., Tsygankov V. D., Rodionov V. A., Isaevich A. G. Optimization of dust suppression processes during underground mining based on full-scale experimentation and ANSYS Fluent simulation. *Gornyi Zhurnal*. 2023, vol. 11, pp. 70 — 75. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.11.

9. Gendler S. G., Fazylov I. R., Abashin A. N. The results of experimental studies of the thermal regime of oil mines in the thermal method of oil production. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-1, pp. 248 — 262. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_248.

10. Timonina N. N., Pyankov V. V. Yaregskoe heavy oil field: development history and development prospects. *Vestnik Institute of geology of Komi science center of Ural Branch RAS*. 2018, no. 7(283), pp. 41 — 48. [In Russ]. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-7-41-48.

11. Kornev A. V., Korshunov G. I., Kudelas D. Reduction of dust in the longwall faces of coal mines: problems and perspective solutions. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021, vol. 26, no. 1, pp. 84 — 97. DOI: 10.46544/ams.v26i1.07.

12. Sytnik S. S., Marinin S. Y. Research results of the fire safety state at oil-refining objects. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*. 2019, no. 7, pp. 370 — 386. [In Russ].

13. Shuvalov Yu. V., Vasiliev A. P., Rodak V. P. Thermal regime of mines and mines. *Ugol'*. 1994, no. 2, pp. 16 — 17. [In Russ].
14. Sidorenko S., Trushnikov V., Sidorenko A. Methane emission estimation tools as a basis for sustainable underground mining of gas-bearing coal seams. *Sustainability (Switzerland)*. 2024, vol. 16, no. 8, article 3457. DOI: 10.3390/su16083457.
15. Dyadkin Yu. D. The method of thermal calculation of mines and mines in difficult conditions. *Journal of Mining Sciences*. 1973, no. 5, pp. 92 — 100. [In Russ].
16. Tskhadaya N. D., Zhuykov A. E., Yagubov Z. Kh. Criteria for evaluating optimal working conditions in oil mine workings. *Petroleum Engineering*. 2012, no. 5, pp. 318 — 325. [In Russ].
17. Kazakov B. P., Shalimov A. V., Zaitsev A. V. Influence of processes of evaporation and condensation of moisture on the thermal regime of deep mines. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 3, pp. 73 — 76. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.03.15.
18. Levkin Yu. M. The usage of remote sensing technology an mathematical modeling for the analysis of emergency mine workings. *Ugol'*. 2022, no. 6(1155), pp. 32 — 34. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-32-34.
19. Durkin S. M., Morozyuk O. A., Ruzin L. M. New thermal mining technologies and assessment of their effectiveness by numerical modeling. *Oil. Gas. Innovations*. 2013, no. 4, pp. 45 — 51.
20. Kaledina N. O., Malashkina V. A. Indicator assessment of the reliability of mine ventilation and degassing systems functioning. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 553 — 561. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8.
21. Klyukin Yu. A., Semin M. A., Levin L. Yu. Investigation of the influence of the method of transporting an oily liquid on microclimatic conditions in an oil mine. *Materialy X Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh»* [Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference «Problems of Development of Hydrocarbon and Ore Mineral Deposits»], Perm, 2017, pp. 371 — 373. [In Russ].
22. Levin L. Yu., Kormshchikov D. S. Features of high-viscosity oil production on the example of the Yarega field. *Nauchnye issledovaniya i innovacii*. 2010, vol. 4, no. 2, pp. 33 — 36. [In Russ].
23. Kolesov E. V., Kazakov B. P., Kuzminykh E. G. Modeling the process of changing the composition of mine air in an inclined dead-end mine working. *Gornoe ekho*. 2020, no. 1, pp. 79 — 84. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2020.1.17.
24. Seregin A. S., Akhtyamov K. D., Fazylov I. R., Belekhov P. A. Influence of ventilation pipe location on airing efficiency in blind drift during operation of machines with internal combustion engines. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 5. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.05.09.
25. Kruglov Yu. V. Application options for a closed oil collection system operating in automatic mode in oil mines. *Strategiya i processy osvoeniya georesursov*. 2017, no. 15, pp. 329 — 332. [In Russ].
26. Kalinina A. A., Kalinin E. P. Geological and economic assessment of the complex use of Yarega heavy oil. *Proceedings of the Komi science centre Ural branch Russian academy of sciences*. 2013, no. 3(15), pp. 110 — 117. [In Russ].
27. Galkin A. F., Kurta I. V., Pankov V. Y., Ilinov M. D. Oil flow influence on accuracy of forecasting mine air temperatures. *Oil Industry*. 2020, no. 4, pp. 98 — 100. [In Russ]. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-4-98 — 100.
28. Moroz N. E., Sidorov D. V., Sonnov M. A. Complex geomechanical modeling of mining vein deposits of block structure. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 6, pp. 71 — 74. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192- 2023-6-71-74.
29. Kozyreva E. N., Shinkevich M. V. Peculiar features of gas-geomechanical processes at a mine coal extraction section. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2010, no. 2, pp. 28 — 35. [In Russ].
30. Gulyaev V. E., Konoplev Yu. P., Gerasimov I. V. Analysis of technological indicators of thermal mining systems of the Yaregskoye oil field. *Problemy razrabotki i ekspluatatsii mestorozhdeniy vysokovyazkikh neftey i bitumov: Materialy mezhregional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Problems of development and operation of high-viscosity oil and bitumen deposits. Materials of the interregional scientific and technical conference], Ukhta, UGTU, 2011, pp. 1218. [In Russ].
31. Menter F. R. Two-equation eddy — viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598 — 1605.

32. Nel A. J. H., Vosloo J. C., Mathews M. J. Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations. *Journal of Energy in Southern Africa*. 2018, vol. 29, no. 3, pp. 22 — 32.

33. Smirnyakov V. V., Lejsle A. V., Magomet R. D., Mukhortikov S. G., Pinsker O. V., Anisimov D. O. Experimental studies to enhance the efficiency of booster fans by changing the rotation frequency of the impeller. *Ugol'*. 2023, no. 7(1169), pp. 59 — 67. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-7-59-67.

34. Kruglov Yu. V. Development of a closed oil collection system operating in automatic mode for the conditions of the oil mines of the Yaregskoye field in the mines. *Strategy and processes of mastering of georesource*. 2016, no. 14, pp. 294 — 297. [In Russ].

35. Klimova I. V., Smirnov Y. G., Rodionov V. A. Modeling of the Interrelations between the working conditions and the health of oil sheds personnel using fuzzy logic. *Occupational Safety in Industry*. 2022, no. 1, pp. 46 — 50. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-1-46-50.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фазылов Ильдар Робертович[1] — канд. техн. наук,
ассистент, e-mail: FazylovIR@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7975-9471,
Гендлер Семен Григорьевич[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: Gendler_SG@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7721-7246,
Прохорова Елизавета Александровна[1] — канд. техн. наук,
ассистент, e-mail: Prokhorova_EA2@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5018-1773,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: Фазылов И.Р., e-mail: FazylovIR@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.R. Fazylov[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant,
e-mail: FazylovIR@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7975-9471,
S.G. Gendler[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: Gendler_SG@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7721-7246,
E.A. Prokhorova[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant,
e-mail: Prokhorova_EA2@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5018-1773,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: I.R. Fazylov, e-mail: FazylovIR@mail.ru.

Получена редакцией 23.05.2025; получена после рецензии 04.07.2025; принята к печати 10.01.2026.
Received by the editors 23.05.2025; received after the review 04.07.2025; accepted for printing 10.01.2026.