

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НЕФТЯНЫХ ШАХТ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ СПОСОБЕ ДОБЫЧИ НЕФТИ

С. Г. Гендлер<sup>1</sup>, И. Р. Фазылов<sup>1</sup>, А. Н. Абашин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

<sup>2</sup> Публичное акционерное общество «Лукойл», Москва, 101000, Россия

**Аннотация:** Показано, что термическое воздействие на нефтяной пласт, осуществляемое для интенсификации добычи нефти, приводит к превышению значений температуры воздуха в горных выработках, определяемых правилами безопасности, что ограничивает время работы людей и снижает производительность труда. В статье описана методика проведения натурных исследований и представлены результаты измерений термодинамических параметров воздушной среды горных выработок 12 уклонных блоков нефтяных шахт. Определены источники теплоты в горных выработках: транспортируемая нефть, разогретый нефтяной пласт, паропроводы, вмещающие породы, прорывы пара. Получены максимальные значения температуры воздуха, влажности воздуха, средней температуры стенок выработки и средняя температура транспортируемой нефтесодержащей жидкости для уклонных блоков, дифференцируемых по времени эксплуатации. Осуществлен корреляционный анализ статистической зависимости между средней температурой воздуха и температурой поверхности горного массива, удельным приращением энтальпии воздуха в буровой галерее и временем разработки блока; установлена доля скрытых тепловыделений в зависимости от времени разработки блока. Предложена методика для определения значения приращения температуры воздуха в буровой галерее  $\Delta t$  и приращение влагосодержания  $\Delta d$  для каждого этапа разработки.

**Ключевые слова:** тепловой режим, нефтепровод, вентиляция, вентиляционная скважина, температура воздуха, климатические параметры, термический способ добычи, термодинамические параметры, нагрев воздуха, энтальпия воздуха.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год №FSRW-2020-001.

**Для цитирования:** 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.

### The results of experimental studies of the thermal regime of oil mines in the thermal method of oil production

S. G. Gendler<sup>1</sup>, I. R. Fazylov<sup>1</sup>, A. N. Abashin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia,

<sup>2</sup> PJSC "Lukoil", Moscow, 101000, Russia

**Abstract:** The article shows that thermal impact on an oil reservoir, carried out to intensify oil production, leads to an excess of air temperatures in mine workings of values determined by safety rules, which limits the working time of people and reduces labor productivity. The article describes a technique for carrying out field studies and presents the results of measuring the thermodynamic parameters of the air environment in mine workings of 12 slope blocks of oil mines. The sources of heat in mine workings are determined: transported oil, heated oil reservoir, steam pipelines containing rocks, steam breakthroughs. The maximum values of air temperature, air humidity, average temperature of the walls of the working and the average temperature of the transported oil-containing liquid for slope blocks, differentiated by operation time, were obtained. Correlation analysis of the statistical relationship between the average air temperature from the surface temperature of the rock massif, the specific increment of air enthalpy in the drilling gallery from the block development time is carried out, and the fraction of latent heat release is established, depending on the block development time. A method is proposed for determining the values of the air temperature increment in the drilling gallery  $\Delta t$  and the moisture content increment  $\Delta d$  for each stage of development.

**Key words:** thermal regime, oil pipeline, ventilation, ventilation well, air temperature, climatic parameters, thermal extraction method, thermodynamic parameters, air heating, air enthalpy.

**Acknowledgements:** The research was performed at the expense of the subsidy for the state assignment in the field of scientific activity for 2021 N<sup>o</sup>FSR W-2020–0014

**For citation:** 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;(6–1):248–262. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_248.

## Введение

Использование с 1972 по 2020 г. на Ярегском нефтетитановом месторождении термических методов добычи нефти определялось необходимостью повышения коэффициента извлечения нефти. Для термического воздействия на нефтяной пласт использовался пар с начальной температурой 180–190<sup>o</sup>C и давлением 1,6 МПа, который закачивался в пласт по системе скважин, расположение и количество которых определялось принятой системой разработки [1–3]. За весь период применения термощахтной системы разработки на Ярегском месторождении средний КИН составил 0,5 [4, 5].

С 2021 г. на Ярегском месторождении ведётся добыча только по одногоризонтной и подземно-поверхностной системе разработки [6]. При осуществлении термического воздействия на пласт в нем формируется температурное поле со значениями тем-

ператур, изменяющимися в интервале от 190 <sup>o</sup>C до начальной температуры пласта. С течением времени разработки происходит увеличение температуры поверхности горных выработок, что, наряду с транспортируемой нефтесодержащей жидкостью, сказывается на термодинамических параметрах воздуха [7, 8]. Таким образом, при термощахтном способе добычи нефти мы сталкиваемся с искусственной «термоаномалией», аналогов которой нет на других шахтах и рудниках.

На основе анализа литературных источников предложена классификация факторов, определяющих тепловой режим горных выработок уклонных блоков (табл. 1).

Прямые факторы – факторы, непосредственно влияющие на термодинамические параметры рудничного воздуха. Косвенные факторы – факторы, определяющие термодинамические и фильтрационные поля, формирую-

Таблица 1

**Перечень факторов, оказывающих воздействие на тепловой режим горных выработок**  
**The list of factors affecting the thermal regime of mining workings**

Прямые факторы	Косвенные факторы
Способ доставки теплоносителя в пласт	Геологическая характеристика нефтяного пласта
Горнотехнические параметры системы разработки	Технология теплового воздействия на пласт
Схема вентиляции уклонного блока	
Способ сбора и транспортировки нефти	

щиеся в нефтяном пласте при закачке пара [9, 10]. Перечисленные в табл. 1 факторы определяются термодинамическими и технологическими параметрами.

Значения термодинамических параметров воздуха в нефтяных шахтах регламентируют «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности», которые устанавливают температуру воздуха в добычных, подготовительных и других действующих выработках у мест, где работают люди: 26 °С при относительной влажности до 90% и 25 °С — при относительной влажности свыше 90%. Однако в этих ПБ делается исключение для горных выработок, в которых проводится закачка теплоносителя в пласт, осуществляется отбор продукции из добывающих скважин, и где проложены трубопроводы с температурой наружной поверхности 40 °С и выше. В этих выработках допускается температура рудничной атмосферы до 36 °С включительно при условии, что в течение рабочей смены горнорабочие не находятся в этих горных выработках постоянно [11, 12].

Очевидно, что в выработках с повышенным значением температуры воздуха эффективность и время работы рабочих снижается, что приводит к необходимости вовлечения в работу дополнительного персонала и, как следствие, уменьшению производи-

тельности труда. Дополнительным негативным фактором следует считать работу людей в условиях повышенных температур, высоких влажностей (более 90%), горячих поверхностей стенок выработок, что может привести к нарушению терморегуляции организма и несчастному случаю.

Разработка мероприятий по нормализации температурного режима должна базироваться на закономерностях формирования температурных полей в горных выработках и окружающем их массиве в течение всего времени разработки блока.

Новизна представленных в статье исследований заключается в изучении вышеотмеченных закономерностей на основе осуществления натуральных исследований теплового режима выработок уклонных блоков нефтяных шахт, эксплуатируемых в настоящее время [13–15].

### **Методология исследования и методика проведения натуральных замеров**

Процедура проведения исследований включает несколько последовательных этапов:

1. Изучение по данным литературных источников интервала изменения термодинамических параметров рудничного воздуха: температуры, относительной влажности, температуры обнаженных поверхностей, в том числе

нефтяного пласта, скорости движения воздушного потока [16, 17].

2. Подготовка и тарировка приборов для осуществления натуральных исследований:

- температура воздуха (МБГО-2);
- температура поверхности стенок горных выработок, трубопроводов, забойной арматуры скважин (пирометр Fluke 561);
- температура транспортируемой жидкости (термометр стеклянный лабораторный ТЛ-2 №2);
- влажность воздуха (ТГО-2);
- скорость воздуха (АПР-2);
- сечение горных выработок (лазерный дальномер BOSCH PLR 50) [18–21].

3. Определение мест размещения приборов в горных выработках. На свежей и исходящей струе из блока (в ходке и уклоне соответственно, см. рис. 1, точки 1 и 10). В буровой галерее и панелях измерения проводились каждые 20 м в выработках малой протяженности (до 200 м) (рис. 1, точки

3–8) и каждые 50 м в выработках протяженностью более 200 м. На рис. 1 представлен пример расположения пунктов замеров измеряемых параметров [22–23].

4. Проведение инструментальных измерений.

### Результаты натуральных исследований теплового режима горных выработок уклонных блоков

Результаты натуральных исследований приведены на рис. 2, представлены параметры микроклимата (максимально зафиксированная температура и влажность воздуха в уклонном блоке), средняя температура транспортируемой нефти и средняя температура стенок горной выработки [24, 25].

Стоит отметить, что каждый блок уникален, а для прогнозирования и регулирования теплового режима в блоке необходим индивидуальный подход, учитывающий технологические, горнотехнические и геологические факторы. В табл. 2 представлены

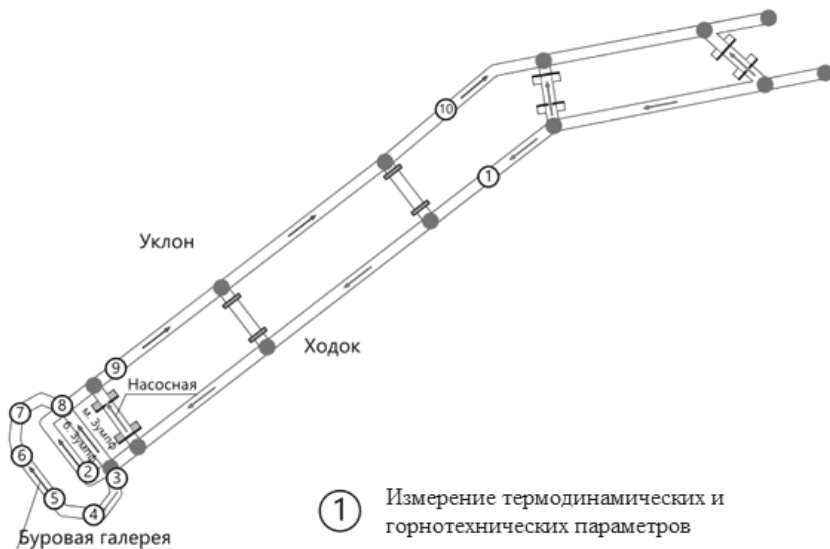


Рис. 1. Пример расположения точек замеров на схеме горных выработок уклонного блока  
Fig. 1. An example of the location of the measurement points on the layout of the mining workings of the slope block

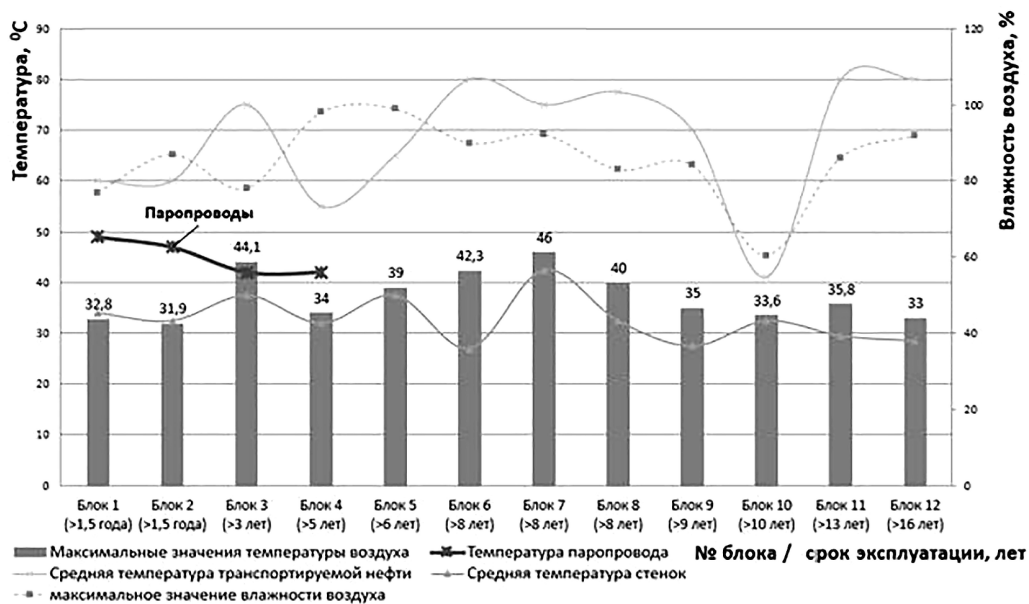


Рис. 2. Результаты натурных исследований уклонных блоков  
 Fig. 2. Results of field studies of slope blocks

Таблица 2

**Технологические параметры уклонных блоков нефтешахт № 1–3**  
**Technological parameters of slope blocks in oil mains no. 1–3**

Блок	Срок эксплуатации блока	Система разработки	t паропровода, °C
Блоки, находящиеся на первом этапе разработки			
Блок 1	1 – 1,5 года	Одногоризонтная	49
Блок 2	1 – 1,5 года	Одногоризонтная	47
Блоки, находящиеся на втором этапе разработки			
Блок 3	Более 3 лет	Подземно-поверхностная; Одногоризонтная	42
Блок 4	5 лет	Подземно-поверхностная	—
Блок 5	6 лет	Подземно-поверхностная	—
Блоки, находящиеся на третьем этапе разработки			
Блок 6	8 лет	Подземно-поверхностная	—
Блок 7	Более 8 лет	Подземно-поверхностная	Умеренный выход пара
Блок 8	Более 8 лет	Подземно-поверхностная	—
Блок 9	9 лет	Подземно-поверхностная	—
Блок 10	10 лет	Подземно-поверхностная	—
Блок 11	Более 13 лет	Подземно-поверхностная	Умеренный выход пара
Блок 12	Более 16 лет	Подземно-поверхностная	—

технологические параметры блоков, дифференцируемых по времени разработки. По срокам эксплуатации блоки можно разделить на 3 этапа: начальная стадия разработки (до 2,5 лет), средний период разработки (от 2,5 до 7 лет) и финальная стадия разработки (более 7 лет). Характерные черты этапов разработки [26]:

– 1 этап — прогрев коллектора, тепловой фронт не достиг горных выработок, нефть является основным источником теплоты в горных выработках.

– 2 этап — интенсивная добыча, тепловой фронт достиг горных выработок (подземно-поверхностная система разработки), существенные тепловыделения от массива и транспортируемой нефти, дебит нефти снижается, возможен выход пара в зонах геологических нарушений;

– 3 этап — пласт истощен, дебит нефти минимален, учащаются прорывы пара [27, 28].

В большей степени блоки разрабатываются подземно-поверхностной системой разработки. Превалирующее большинство блоков находится на третьей стадии разработки [29–31].

Исходя из результатов натуральных исследований, можно сделать вывод, что наибольшее значение температуры воздуха и транспортируемой нефти наблюдается в блоках, находящихся на 2 этапе разработки [32–34].

В некоторых блоках (блок 7 и блок 11) наблюдается умеренный выход пара. Согласно наблюдениям, в блоках, расположенных в зонах геологических нарушений, движение пара по нефтяному коллектору осуществляется по пути наименьшего сопротивления по трещинам. Для таких блоков характерен выход пара в горные выработки, что оказывает существенное влияние на энтальпию шахтного воздуха (рис. 2).

Для определения величины теплопоступлений и интенсивности массообменных процессов в каждом блоке были выполнены измерения температуры поступающего и исходящего из буровой галереи/панели воздуха ( $t_1$  и  $t_2$ ), °С; влажности поступающего и исходящего из буровой галереи/панели воздуха ( $\phi_1$  и  $\phi_2$ ), %, объемного расхода воздуха в буровой галерее/панели ( $Q$ ), м<sup>3</sup>/с; протяженности буровой галереи/панели ( $L$ ). Результаты измерений представлены в табл. 3.

### **Анализ и обработка результатов исследования**

Из результатов натуральных исследований получена зависимость средней температуры воздуха по длине галереи от средней температуры поверхности блока (рис. 3).

По мере разработки блока отношение средней температуры воздуха к температуре поверхности горных выработок стремится к единице (рис. 4), это свидетельствует об увеличении тепловыделений в рудничную атмосферу и выравнивании температурного поля в горном массиве.

Для определения энтальпии воздуха выполнены расчеты явных и скрытых источников теплоты, по формулам:

1. Удельное тепловыделение от явных источников теплоты, выражение 1:

$$\Delta q_{\text{явн}} = 1,005\Delta t, \text{ Дж/кг}, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  — изменение температуры воздуха в выработке, °С.

2. Удельное тепловыделение от скрытых источников теплоты (изменение влагосодержания воздуха), выражение 2 [35]:

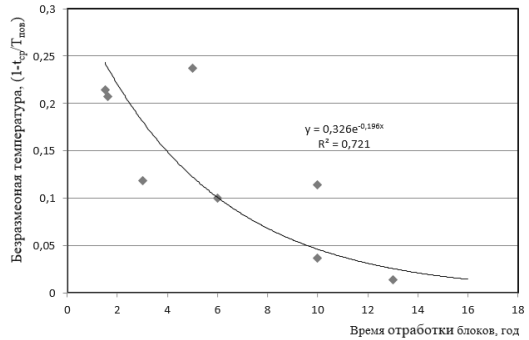
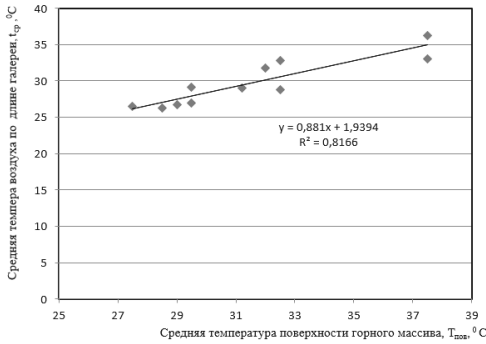
$$\Delta q_{\text{скр}} = r\Delta d, \text{ Дж/кг}, \quad (2)$$

где  $\Delta d$  — изменение влагосодержания в выработке, г/кг;  $r$  — теплота парообразования воды, Дж/кг.

Таблица 3

**Результаты инструментальных исследований температурного режима горных выработок**  
**The results of instrumental studies of the temperature regime of mining workings**

Блок	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\varphi_1, \%$	$\varphi_2, \%$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$L, \text{м}$
Блок 1	20,60	32,80	62,00	77,00	4,70	180,00
Блок 2	19,60	31,90	54,00	85,00	7,90	235,00
Блок 3	23,10	43,00	71,90	74,00	4,24	240,00
Блок 4	26,00	32,1	71,00	98,00	5,1	362
Блок 5	22,00	32,0	0,12	0,42	11,6	138
Блок 6	23,60	40,00	40,00	61,30	14,60	664,00
Блок 7	26,90	45,60	55,30	79,00	10,90	1095,00
Блок 8	27,50	38,00	42,00	98,00	9,50	270,00
Блок 9	21,00	32,00	47,00	84,00	9,20	102,00
Блок 10	25,00	32,60	48,20	54,00	14,40	121,00
Блок 11	23,00	35,20	68,00	86,00	13,90	115,00
Блок 12	20,00	32,50	70,00	82,00	12,50	110,00



**Рис. 3. Зависимость средней температуры воздуха от температуры поверхности горного массива и зависимость безразмерной температуры от времени разработки блока**  
**Fig. 3. Dependence of the average air temperature on the temperature of the surface of the rock mass and the dependence of the dimensionless temperature on the development time of the block**

$$\Delta d = 0,622 \frac{(P_{н.п.2} \varphi_2 - P_{н.п.1} \varphi_1)}{P}, \text{ г/кг}, \quad (3)$$

где  $P_{н.п.i}$  — давление насыщенного пара в точке замера, Па;  $\varphi_i$  — относительная влажность воздуха в точке замера, доли ед.

3. Удельное приращение энтальпии воздуха:

$$\Delta i = \frac{q_{явн} + q_{скр}}{GLU}, \text{ кВт/м}^2, \quad (4)$$

где  $G$  — массовый расход воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $L$  — протяженность буровой галереи, м;  $U$  — периметр буровой галереи [36–38].

Результаты расчета приращения энтальпии шахтного воздуха, поступающего в буровые галереи, представлены на рис. 4.

Отношение скрытой теплоты к приращению энтальпии в зависимости от времени разработки блока представлены на рис. 5.

Из результатов расчетов (рис. 4) видно, что происходит увеличение удельного приращения энтальпии воздуха с увеличением продолжительности эксплуатации блока. Это объясня-

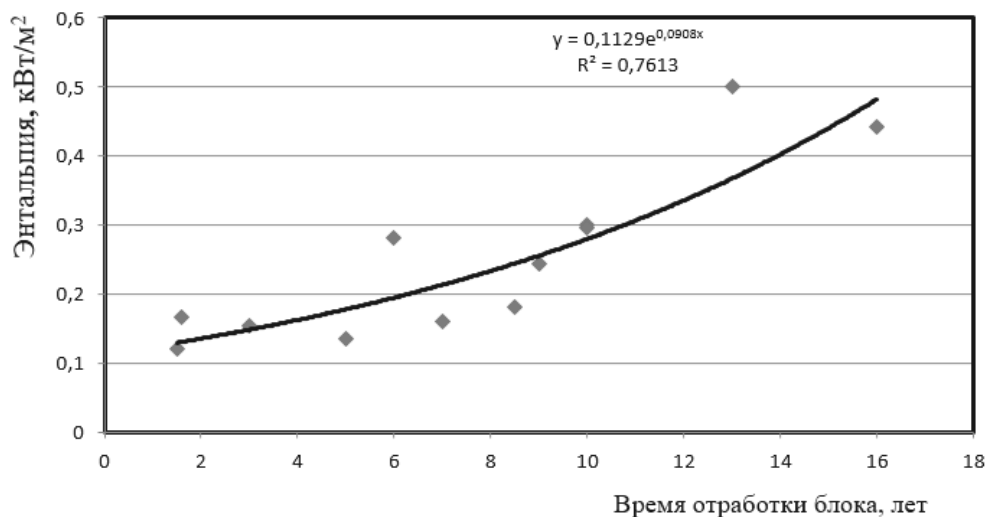


Рис. 4. Удельное приращение энтальпии воздуха в буровой галерее в зависимости от времени разработки блока

Fig. 4. Specific increment of air enthalpy in the well gallery, depending on the block development time

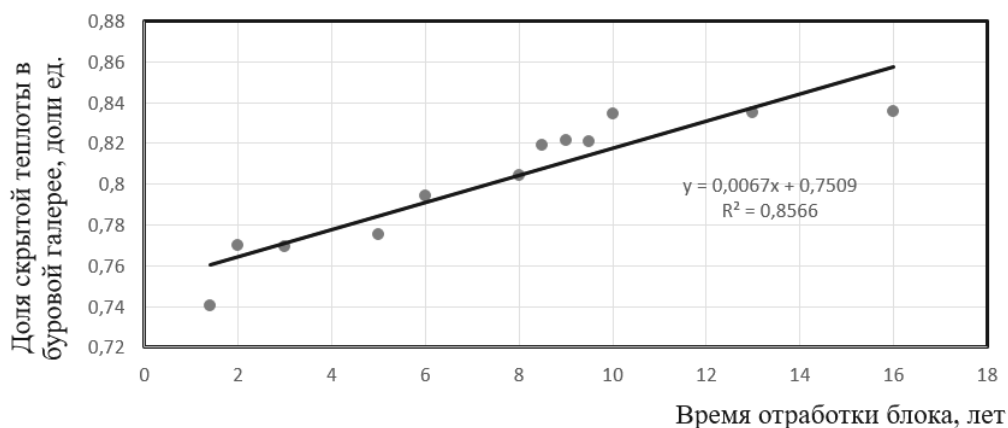


Рис. 5. Доля скрытых тепловыделений в зависимости от времени разработки блока

Fig. 5. The share of latent heat release, depending on the development time of the block

ется продвижением теплового фронта от нагнетательных скважин к горным выработкам, а также увеличением интенсивности массообменных процессов. По мере истощения нефтесодержащего коллектора его проницаемость увеличивается, что приводит к прорывам пара в горные выработки через добычные скважины, горный массив и геологические нарушения. Увеличение доли скрытой теплоты

по отношению к явной теплоте, что подтверждается на рис. 5., свидетельствует об увеличении влагосодержания шахтного воздуха в буровой галерее.

На основе проведенных исследований получена эмпирическая зависимость величины удельных тепловыделений и удельного приращения влагосодержания в буровой галерее от времени эксплуатации блока (рис. 6).



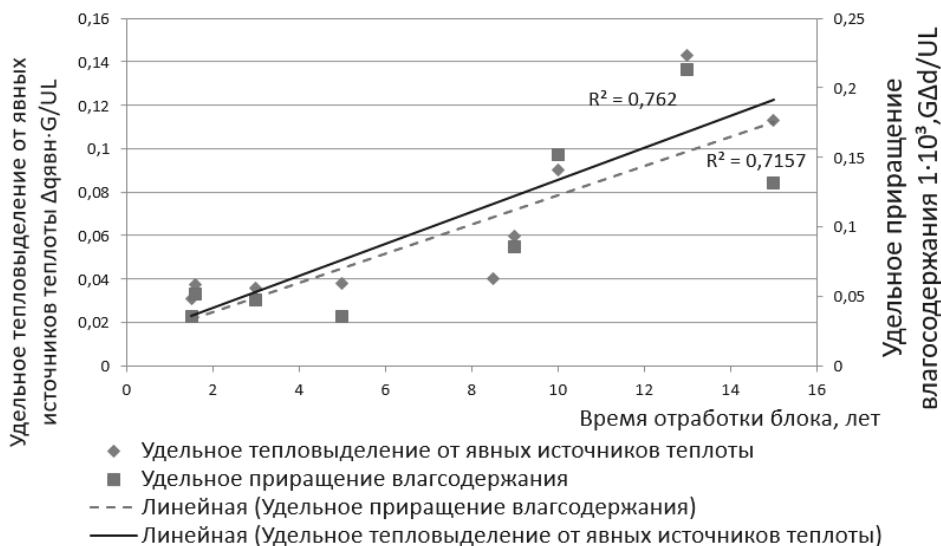


Рис. 6. Значения удельных тепловыделений и удельного приращения влагосодержания в зависимости от времени разработки блока  
 Fig. 6. The values of the specific heat release and the specific increment of moisture content depending on the development time of the block

По данным эмпирическим зависимостям, имея горнотехнические параметры буровой галереи ( $L, U, G$ ), предоставляется возможность определить значения приращения температуры воздуха в буровой галерее  $\Delta t, ^\circ\text{C}$  и приращения влагосодержания  $\Delta d, \text{г/кг}$  на различных этапах разработки уклонного блока.

### Заключение

1. На основе наблюдений и натуральных исследований идентифицированы и проанализированы факторы, определяющие тепловой режим горных выработок: способ закачки теплоносителя, горнотехнические параметры системы разработки, схема вентиляции уклонного блока, способ транспортировки нефти и технология воздействия на нефтяной пласт.

2. Определено, что максимальные значения ( $40 - 46 ^\circ\text{C}$ ) температуры воздуха наблюдаются в блоках, находящихся на 2 этапе разработки;

3. Установлено, что отношение явной теплоты к скрытой теплоте, поступающей в воздух от источников теплоты, находящихся в буровой галерее уклонного блока, по мере отработки блока снижается.

4. Осуществлен корреляционный анализ статистической связи между средней температурой воздуха и температурой поверхности горного массива, удельным приращением энтальпии воздуха в буровой галерее и временем разработки блока и установлена доля скрытых тепловыделений в зависимости от времени разработки блока.

5. Получена эмпирическая зависимость величины удельных тепловыделений и удельного приращения влагосодержания в буровой галерее от времени эксплуатации блока, позволяющая определить значения приращения температуры воздуха в буровой галерее  $\Delta t$  и приращение влагосодержания  $\Delta d$ .

## Вклад авторов

*Гендлер С. Г.* — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, анализ результатов исследования.

*Фазылов И. Р.* — получение данных для анализа, написание текста статьи, анализ результатов исследования и под-

готовка данных, выполнение работы по систематизации материала.

*Абашин А. Н.* — анализ результатов исследования, выполнение работы по систематизации материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коноплев Ю. П., Алабушин А. А., Гуляев В. Э.* Опыт и перспективы развития термощахтной разработки Ярегского месторождения высоковязкой нефти // Высоковязкие нефти и природные битумы: проблемы и повышение эффективности разведки и разработки месторождений: Материалы международной научно-практической конференции. — 2012. — С. 74–77.
2. *Пранович А. А., Власенко В. И.* Комплексный подход к освоению Ярегского нефтетитанового месторождения // Горный журнал. — 2007. — № 3. — С. 69–70.
3. *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.
4. *Герасимов И. В.* Большое будущее Яреги. О комплексном развитии Ярегского нефтетитанового месторождения // Регион. — 2012. — № 9. — С. 7–10.
5. *Левин Л. Ю., Кормицков Д. С.* Особенности добычи высоковязкой нефти на примере Ярегского месторождения // Научные исследования и инновации. — 2010. — Т.4. — № 2. — С. 33–36.
6. *Гендлер С. Г., Фазылов И. Р.* Оценка эффективности использования закрытой системы сбора нефти для нормализации микроклимата в эксплуатационных галереях нефтяных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 65–78. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_65.
7. *Гуляев В. Э., Коноплев Ю. П., Герасимов И. В.* Анализ технологических показателей систем термощахтной разработки Ярегского нефтяного месторождения // Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов: Материалы межрегиональной научно-технической конференции. — Ухта: УГТУ, 2011. — С. 1218.
8. *Дуркин С. М., Морозюк О. А., Рузин Л. М.* Новые термощахтные технологии и оценка их эффективности путём численного моделирования // Нефть. Газ. Новации. — 2013. — № 4. — С. 45–51.
9. *Левин Л. Ю., Кормицков Д. С.* Особенности добычи высоковязкой нефти на примере Ярегского месторождения // Научные исследования и инновации. — 2010. — Т.4. — № 2. — С. 33–36.
10. *Прищепина О. М., Халимов Э. М.* Трудноизвлекаемая нефть: потенциал, состояние и возможности освоения // Нефтегазовая вертикаль. — 2011. — № 5. — С. 24–29.
11. *Зайцев А. В., Семин М. А., Ключкин Ю. А.* Исследование критериев нормирования микроклиматических условий в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 12. — С. 151–156.
12. *Зайцев А. В.* Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук, 2013. — 19 с.
13. *Казаков Б. П., Левин Л. Ю., Шалимов А. В., Зайцев А. В.* Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при веде-

нии горных работ // Записки Горного института. — 2017. — Т. 223. — С.116–124. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.116.

14. Рудаков М. Л., Коробицына М. А. О возможности нормализации температуры воздуха в буровых галереях нефтяных шахт // Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 8. — С. 66–71. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-66–71.

15. Лобынцев А. К., Фомин С. И. Оценка степени влияния горнотехнических факторов на норматив готовых к выемке запасов при проектировании открытой разработки сложноструктурных рудных месторождений // Рациональное освоение недр. — 2021. — № 5. — С. 40–43. DOI: 10.26121/RON.2021.52.15.004.

16. Sadykov M. I., Blinov P. A., Nutskova M. V. Use of the water-swellable polymers (WSP) for wellbore stabilization in intensely fractured rock intervals // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 266, p. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202126601013.

17. Ключкин Ю. А., Семин М. А., Зайцев А. В. Экспериментальное исследование микроклиматических условий и факторов их формирования в нефтяной шахте // Вестник ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2018. — Т. 18. — № 1. — С. 63–75.

18. Komolov V., Belikov A., Demenkov P. Research on Load-Bearing Constructions Behavior During Pit Excavation Under «Slurry Wall» Protection // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022, no. 180, pp. 313–323. DOI: 10.1007/978–3-030–83917–8\_29.

19. Palaev A. G., Shammazov I. A., Dzhemilev E. R. Research of the impact of ultrasonic and thermal effects on oil to reduce its viscosity // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1679 (5), 052073. DOI: 10.1088/1742–6596/1679/5/052073.

20. Babyr N., Babyr K. To improve the contact adaptability of mechanical roof support // E3S Web of Conferences. 2021, no. 266, pp. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202126603015.

21. Магомед Р. Д., Серегин А. С. Повышение эффективности дренирования метана // Горный журнал. — 2017. — № 7. — С. 92–95. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.18.

22. 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

23. 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.

24. Alabyev V. R., Rudakov M. L., Korobitsyna M. A. Peculiarities of heat-mass-exchange processes in faces developing steep coal seams // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2017, no. 114, pp. 349–400. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-66–7.

25. 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.

26. Исаевич А. Г., Трушкова Н. А., Шалимов А. В. Регулирование теплового режима атмосферы рабочих зон при термошахтной обработке пластов неглубокого залегания // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — №1. — С.97–100.

27. Алабьев В. Р., Новиков В. В., Пашинян Л. А., Бажина Т. П. Нормализация теплового режима протяженных тупиковых выработок при высоких температурах пород на основе шахтных передвижных кондиционеров // Записки Горного института. — 2019. — № 237. — С. 251–258. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.251.

28. Дядькин Ю. Д. Методика теплового расчета шахт и рудников в сложных условиях. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — Н.: Наука, 1973. — С. 92–100.

29. 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.

30. 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.

31. Клюкин Ю. А., Семин А. В., Зайцев А. В. Экспериментальное исследование микроклиматических условий и факторов их формирования в нефтяной шахте // Вестник ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2018. — Т. 18. — № 1. — С. 63–75.

32. Smirniakov V. V., Smirniakova V. V. Improving safety of mining operations by up-grading the methods of gas presence monitoring in the sheth grooves // Journal of Industrial Pollution Control. 2017, vol. 33, no. 1, pp. 856–563.


33. Pretorius J. G., Mathews M. J., Mare P., Kleingeld M., Rensburg J. Implementing a DIKW model on a deep mine cooling system. // International Journal of Mining Science and Technology. 2019, vol. 29, no. 2, pp. 319–326. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.07.004.

34. Qing Zheng, Ying Ke, Hongfu Wang. Design and evaluation of cooling workwear for miners in hot underground mines using PCMs with different temperatures // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2020, vol. 26, pp. 1–11. DOI: 10.1080/10803548.2020.1730618.

35. Баловцев С. В. Оценка схем вентиляции с учетом горно-геологических и горнотехнологических условий отработки угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 173–183. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06–0-173–183.

36. Patankar S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. CRC press. 2018. DOI: doi.org/10.1201/9781482234213.

37. Rouabhi A., Jahangir E., Tounsi H. Modeling heat and mass transfer during ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018, vol. 120, pp. 523–533. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.065.

38. Brazhe A. S. Based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns // Physical Review E. 2018, vol. 97, no. 6, article 061301. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.061301. 

## REFERENCES

1. Konoplev Yu. P., Alabushin A. A., Gulyaev V. E. Experience and prospects of development of thermal-shaft development of the Yarega. High-viscosity oil field. *Vysokovязкие нефти и природные битумы: проблемы и повышение эффективности разведки и разработки месторождений. Материалы международной научно-практической конференции.* 2012, pp. 74–77. [In Russ].

2. Pranovich A. A., Vlasenko V. I. Complex approach to mastering of Yaregsky oil-titanium deposit. *Gornyi Zhurnal.* 2007, no. 3, pp. 69–70. [In Russ].

3. Kalinina A. A., Kalinin E. P. Geoeconomic estimation of multipurpose utilization of the Yarega heavy oil. *News of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.* 2013, no. 3 (15), pp. 110–117. [In Russ].

4. Gerasimov I. V. Yarega's great future. On the integrated development of the Yarega oil-titanium field. *Region.* 2012, no. 9, pp. 7–10. [In Russ].

5. Levin L. Yu., Kormshchikov D. S. Features of high-viscosity oil production on the example of the Yarega field. *Nauchnye issledovaniya i innovacii*. 2010, no. 2, pp. 33–36. [In Russ].
6. Gendler S. G., Fazylov I. R. Application efficiency of closed gathering system toward microclimate normalization in operating galleries in oil mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, vol. 9, pp. 65–78. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_65.
7. Gulyaev V. E., Konoplev Yu. P., Gerasimov I. V. Analysis of technological indicators of thermal mining systems of the Yaregskoye oil field. *Problems of development and operation of high-viscosity oil and bitumen deposits: Materials of the interregional scientific and technical conference. Ukhta, UGTU*. 2011, p. 1218. [In Russ].
8. Durkin S. M., Morozuk O. A., Ruzin L. M. New thermal shaft procedures and evaluation of efficiency through numerical modeling. *Oil. Gas. Innovations*. 2013, no. 4, pp. 45–51. [In Russ].
9. Levin L. Yu., Kormshchikov D. S. Features of high-viscosity oil production on the example of the Yaregskoye field. *Research and innovation*. 2010, vol. 4, no. 2, pp. 33–36. [In Russ].
10. Prishchepa O. M., Khalimov E. M. Hard-to-Recover Oil: Potential, Condition and Development Opportunities. *Oil and gas vertical*. 2011, no. 5, pp. 24–29. [In Russ].
11. Zaitsev A. V., Semin M. A., Klyukin Yu. A. Improvement of microclimate conditions rationing criteria in mine airways. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, vol. 12, pp. 151–156. [In Russ].
12. Zaitsev A. V. Development of methods for normalizing microclimatic conditions in mine workings of deep mines. *Abstract of Ph. D., thesis*. 2013, 19 p. [In Russ].
13. Kazakov B. P., Levin L. Y., Shalimov A. V., Zaitsev A. V. Development of energy-saving technologies providing comfortable microclimate conditions for mining. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 223, pp. 116–124. [In Russ]. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.116.
14. Rudakov M. L., Korobitsyna M. A. On the Possibility of Normalizing Air Temperature in the Mine Workings of the Oil Mines. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2019, no. 8, pp. 66–71. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-66 – 71.
15. Lobyntsev A. K., Fomin S. I. Assessment of the influence of mining factors degree on the standard of prepared reserves when designing open-pit mining of complex-structure ore deposits. *Ratsional'noye osvoyeniye nedr [Mineral Mining & Conservation (MMC)]*. 2021, no. 5, pp. 40–43. DOI: 10.26121/RON.2021.52.15.004. [In Russ].
16. Sadykov M. I., Blinov P. A., Nutskova M. V. Use of the water-swellable polymers (WSP) for wellbore stabilization in intensely fractured rock intervals. *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 266, p. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202126601013.
17. Klyukin Yu. A., Semin M. A., Zaitsev A. V. The experimental study of microclimatic conditions and factors of their formation in an oil mine. *PNRPU Bulletin: Geology. Oil and gas and mining*. 2018, no. 1, pp. 63–75. [In Russ].
18. Komolov V., Belikov A., Demenkov P. Research on Load-Bearing Constructions Behavior During Pit Excavation Under «Slurry Wall» Protection. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022, no. 180, pp. 313–323. DOI: 10.1007/978 – 3-030 – 83917 – 8\_29.
19. Palaev A. G., Shammazov I. A., Dzhemilev E. R. Research of the impact of ultrasonic and thermal effects on oil to reduce its viscosity. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1679 (5), 052073. DOI: 10.1088/1742 – 6596/1679/5/052073.
20. Babyr N., Babyr K. To improve the contact adaptability of mechanical roof support. *E3S Web of Conferences*. 2021, no. 266, pp. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202126603015.
21. Magomet R. D., Seregin A. S. Enhancement of pre-mining methane drainage efficiency. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 7, pp. 92–95. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.18. [In Russ].

22. 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].
23. 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].
24. Alabyev V. R., Rudakov M. L., Korobitsyna M.A. Peculiarities of heat-mass-exchange processes in faces developing steep coal seams. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2017, no. 114, pp. 349–400. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-66 – 7.
25. 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. *Strategiya i processy osvoeniya georesursov*. 2016, no. 14, pp. 294–297. [In Russ].
26. Isayevich A. G., Trushkova, N.A., Shalimov A. V. Regulation of the thermal regime of the atmosphere of working zones during thermal mining of shallow layers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, vol. 1, pp. 97–100. [In Russ].
27. Alabyev V. R., Novikov V. V., Pashinyan L. A., Bazhina T. P. Normalization of Thermal Mode of Extended Blind Workings Operating at High Temperatures Based on Mobile Mine Air Conditioners. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 237, pp. 251–258. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.251/
28. Dyad'kin Yu. D. The method of thermal calculation of mines and mines in difficult conditions. *Physical and technical problems of mining*, Nauka. 1973, no. 5, pp. 92–100. [In Russ].
29. Kazakov B. P., Shalimov A. V., Zaitsev A. V. Effect of water evaporation and condensation on thermal conditions in deep mines. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 3, pp. 73–76. DOI: 10.17580/gzh.2016.03.15. [In Russ].
30. 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 Vserossijskoj nauchnotekhnicheskoy konferencii. Problemy razrabotki mestorozhdenij uglevodородnyh i rudnyh poleznyh iskopaemyh. Perm.* 2017, pp. 371–373. [In Russ].
31. Klyukin Yu. A., Semin A. V., Zaitsev A. V. Experimental study of microclimatic conditions and factors of their formation in an oil mine. *Vestnik PNIPU: Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 2018, no. 1, pp. 63–75. [In Russ].
32. Smirniakov V. V., Smirniakova V. V. Improving safety of mining operations by up-grading the methods of gas presence monitoring in the sheth grooves. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017, vol. 33, no. 1, pp. 856–563.
33. Pretorius J. G., Mathews M. J., Mare P., Kleingeld M., Rensburg J. Implementing a DIKW model on a deep mine cooling system. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, vol. 29, no. 2, pp. 319–326. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.07.004.
34. Qing Zheng, Ying Ke, Hongfu Wang. Design and evaluation of cooling workwear for miners in hot underground mines using PCMs with different temperatures. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2020, vol. 26, pp. 1–11. DOI: 10.1080/10803548.2020.1730618.
35. Balovtsev S. V. Assessment of ventilation circuits with regard to geological and geotechnical conditions of coal seam mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(6):173 – 183. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06 – 0-173 – 183.
36. Patankar S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. *CRC press*. 2018. DOI: doi.org/10.1201/9781482234213.
37. Rouabhi A., Jahangir E., Tounsi H. Modeling heat and mass transfer during ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, vol. 120, pp. 523–533. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.065.

38. Brazhe A. S. Based measures of entropy and complexity for two-dimensional patterns. *Physical Review E*. 2018, vol. 97, no. 6, article 061301. DOI: 10.1103/PhysRevE.97.061301.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Гендлер Семен Григорьевич* — докт. техн. наук, профессор кафедры безопасности производств, <https://orcid.org/0000-0002-7721-7246>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: [gendler\\_SG@pers.spmi.ru](mailto:gendler_SG@pers.spmi.ru);

*Фазылов Ильдар Робертович* — аспирант 2 года обучения, <https://orcid.org/0000-0001-7975-9471>, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О., д. 2, Россия, e-mail: [Fazylov\\_IR@pers.spmi.ru](mailto:Fazylov_IR@pers.spmi.ru);

*Абашин Александр Николаевич* — начальник управления промышленной безопасности, ПАО «Лукойл», 101000, Москва, бульвар Сретенский, д. 11, Россия, e-mail: [Aleksandr.Abashin@lukoil.com](mailto:Aleksandr.Abashin@lukoil.com).

**Для контактов:** *Фазылов Ильдар Робертович*, e-mail: [Fazylov\\_IR@pers.spmi.ru](mailto:Fazylov_IR@pers.spmi.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Gendler S. G.*, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Safety Department, <https://orcid.org/0000-0002-7721-7246>, Saint Petersburg Mining University, St Petersburg, 199106, Russia, e-mail: [gendler\\_SG@pers.spmi.ru](mailto:gendler_SG@pers.spmi.ru);

*Fazylov I. R.*, second year postgraduate student, <https://orcid.org/0000-0001-7975-9471>, Saint Petersburg Mining University, St Petersburg, 199106, Russia, e-mail: [Fazylov\\_IR@pers.spmi.ru](mailto:Fazylov_IR@pers.spmi.ru);

*Abashin A. N.*, Head of Industrial Safety Department of PJSC “Lukoil”, PJSC “Lukoil”, Moscow, 101000, Russia, e-mail: [Aleksandr.Abashin@lukoil.com](mailto:Aleksandr.Abashin@lukoil.com).

**Corresponding author:** *Fazylov I. R.*, e-mail: [Fazylov\\_IR@pers.spmi.ru](mailto:Fazylov_IR@pers.spmi.ru)

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 30.05.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 30.05.2022; accepted for printing 10.05.2022.

