

УДК 622.253.35

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД БЕРЕЗОВСКОГО РУДНИКА ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»

Зайцев Артем Вячеславович¹,
aerolog.artem@gmail.com

Бородавкин Дмитрий Алексеевич¹,
borodavkin.dmitriy@gmail.com

Бублик Сергей Анатольевич¹,
serega-bublik@mail.ru

Агеева Ксения Михайловна¹,
kimageeva@gmail.com

¹ Горный институт УрО РАН,
Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а.

Актуальность. С увеличением глубины ведения работ происходит естественное повышение температур горных пород и, как следствие, увеличение температуры воздуха в рабочих зонах. Наиболее эффективным мероприятием по снижению температур воздуха является применение систем кондиционирования. Наличие данных о тепловых свойствах горных пород на этапе предпроектной проработки позволяет избежать необоснованных запасов мощностей холодильного оборудования, снижая капитальные и эксплуатационные затраты.

Цель: исследование температуры нетронутого массива горных пород для определения геотермической ступени для условий Березовского рудника 1 РУ ОАО «Беларуськалий».

Объектом исследования в настоящей работе является шахтное поле Березовского рудника компании ОАО «Беларуськалий». **Методы:** проведены экспериментальные измерения температуры пород в шпурах, пробуренных в горных выработках на различных глубинах, проведена статистическая обработка данных, выполнена аппроксимация поля температуры как функции от пространственных координат.

Результаты. Исследованы температуры нетронутого массива горных пород, получена аппроксимирующая зависимость ожидаемой температуры пород на заданной глубине. Полученная в результате исследований величина геотермической ступени составила 64,9 м/°С, что выше значений, рассчитанных ранее согласно инструкции по расчету требуемого количества воздуха для исследуемого рудника и данных скважинной термометрии. При этом полученное значение соответствует данным карты геотермической ступени в верхней части земной коры на территории СССР. Проведенное исследование температур массива горных пород для горизонтального разреза шахтного поля указывает на наличие зависимости температуры от всех трех координат, что свидетельствует о наличии латеральной изменчивости поля температур, которая не может быть объяснена исключительно падением пласта.

Ключевые слова:

Рудник, коэффициент детерминации, геотермия, геотермическая ступень, термовлажностная съемка рабочих зон, температура массива горных пород, тепловой режим.

Введение

В настоящее время большинство предприятий вынуждены разрабатывать все более глубокие залежи. Увеличение глубины ведения горных работ ведет к естественному повышению температуры породного массива, что в первую очередь вызвано геотермической ступенью [1]. Как следствие, температуры воздуха в зонах ведения горных работ также возрастают из-за теплообмена с породным массивом [2]. Кроме того, на температуру воздуха в горных выработках рудника могут влиять температура воздуха на дневной поверхности, гидростатическое сжатие/расширение воздуха при его движении по вертикальным/наклонным выработкам, влагообмен, окислительные процессы, а также местные источники теплоты [3–5].

Таким образом, в современных условиях интенсивного развития горных работ негативное воздействие, вызванное повышением температур, становится все более заметным, что неблагоприятно влияет на здоровье горнорабочих, снижает производительность

труда, увеличивает вероятность возникновения аварийных ситуаций на горных предприятиях [6, 7]. Все это ведет к необходимости регулирования теплового режима в горных выработках.

Согласно пункту 152 «Правил безопасности при ведении горных работ...» температура воздуха в забоях подготовительных и очистных выработок и на рабочих местах с постоянным присутствием персонала не должна превышать 26 °С. При температуре воздуха выше 26 °С должны предусматриваться различные мероприятия по его охлаждению. Разработка мероприятий, направленных на регулирование теплового режима, обычно влечет за собой значительные финансовые затраты. При этом измерение и анализ распределения свойств горных пород в массиве на этапе предпроектной проработки позволяют избежать необоснованных запасов мощностей оборудования, используемого для борьбы с негативным влиянием температур, и тем самым снижать капитальные и эксплуатационные затраты на реализацию мероприятий

по охлаждению воздуха [8]. Все это влечет за собой повышение экономических показателей предприятия и повышает его конкурентоспособность на рынке.

Объектом исследования в настоящей работе является Березовский рудник 1 РУ ОАО «Беларуськалий» Старобинского месторождения. Для данного рудника, как и для других калийных рудников Старобинского месторождения, актуальной является проблема нормализации микроклимата в рабочих зонах. Это связано с большой глубиной ведения горных работ, а также с существенным тепловым влиянием применяемого горнодобывающего оборудования. Для корректного прогнозирования теплового режима подземных рабочих зон рудника и подбора эффективных мероприятий по нормализации теплового режима необходимо, в частности, знать геотермическую ступень (геотермический градиент) на данном участке. Последняя, как правило, определяется из скважинной термометрии [7, 9, 10].

Однако этот способ не является единственно возможным, помимо него для эксплуатируемых рудников могут применяться методы, основанные на прямом измерении температуры пород на различных глубинах и дальнейшем определении аппроксимирующей зависимости температуры от глубины. В опре-

деленных условиях применяется также метод, в рамках которого измеряется не температура пород, а температура воздуха. Именно такой метод применялся при разработке «Инструкции по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания рудников Старобинского месторождения», в 2014 г. Были выполнены замеры температуры воздуха в вентиляционных штреках главных направлений. Мотивацией для выбора данного метода послужило отсутствие данных по распределению температуры породного массива по глубине геотермических скважин, а также известный факт о том, что при удалении воздушной струи от воздухоподающих стволов на расстоянии 2500–3000 м происходит процесс выравнивания температуры воздуха до температуры породного массива [3]. Следовательно, температуры воздуха в выработках, находящихся на данном удалении и не имеющих техногенных источников выделения теплоты, наиболее близки к температуре непо потревоженного породного массива. Измеренные температуры в вентиляционных штреках главных направлений были приняты в качестве температур нетронутого породного массива для определения геотермической ступени. Результаты замеров представлены в табл. 1.

Таблица 1. Данные температурных съемок на рудниках ОАО «Беларуськалий»

Table 1. Thermal survey data at the mines of Belaruskali company

| Рудник Mine | Ствол Shaft | Горизонт Horizon | Средняя температура пород, °С Average rock temperature, °С | Абсолютная отметка, м Elevation, m | Глубина, м Depth, m |
|--|----------------|--|---|--|------------------------|
| 1 РУ 1 MG | 3 | Устье Shaft collar | 27,9 | 154,0 | 0,0 |
| | | –264 м/м | 18,7 | –264,1 | 418,1 |
| | | –305 м/м | 19,5 | –305,0 | 459,0 |
| | | –430 м/м | 20,5 | –446,0 | 600,0 |
| 2 РУ 2 MG | 3 | Устье Shaft collar | 21,5 | 180,3 | 0 |
| | | –445 м/м | 20,1 | –445,3 | 625,3 |
| 3 РУ 3 MG | 3 | Устье Shaft collar | 20,1 | 162,0 | 0,00 |
| | | –420 м/м | 19,4 | –424,7 | 586,7 |
| | | –620 м/м | 21,9 | –621,4 | 783,4 |
| 4 РУ 4 MG | 3 | Устье Shaft collar | 15,3 | 155,0 | 0,0 |
| | | –440 м/м | 20,9 | –438,0 | 594,0 |
| | 4 | Устье Shaft collar | 14,4 | 155,0 | 0,0 |
| | | –670 м/м | 21,6 | –636,7 | 791,7 |
| | 6 | Устье Shaft collar | 15,4 | 148,0 | 0,0 |
| | | Березовский участок Berezovsky area | 19,4 | –421,3 | 570,3 |
| Краснослободский рудник Krasnoslobodsky mine | 2 | Устье Shaft collar | 20,2 | 178,0 | 0 |
| | | –290 м/м | 20,5 | –290,1 | 468,1 |
| | | –445 м/м | 21,4 | –443,8 | 621,8 |

Полученный массив экспериментальных данных позволил получить аппроксимирующую зависимость ожидаемой температуры пород на заданной глубине:

$$t_{\text{п}} = 5,31 + 0,015 \cdot z, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

где z – глубина искомой точки относительно земной поверхности, м. Глубина определялась путем суммирования высотной отметки искомой точки, взятой по

модулю, с высотной отметкой поверхности воздухоподающих стволов рудника. Абсолютное отклонение зависимости (1) от экспериментальных данных составляет 1,12 °С, среднее отклонение – 0,46 °С.

Важно отметить, что данные, полученные в результате замеров по описанному методу, могут не отражать истинную температуру нетронутого массива,

поскольку на них накладывается дополнительный искажающий фактор, связанный с изменением температуры породного массива вследствие эксплуатации горных выработок (влияние теплоты горного оборудования, температуры атмосферного воздуха и пр.).

Измерения температуры пород стенок горных выработок также могут нести в себе определенную погрешность, тем большую, чем длительнее эксплуатируется рассматриваемая горная выработка, чем выше скорость воздуха в выработке и чем выше разница температур между породным массивом и воздухом [3, 11]. Из существующих представлений о закономерностях теплопереноса в породах [12, 13] следует, что в горных выработках, удаленных от воздухоподводящих стволов и не имеющих техногенных источников тепловыделений, глубина тепловых возмущений обычно не превышает 1–2 м. Под глубиной тепловых возмущений понимается расстояние от стенки выработки вглубь массива, на котором температура породы испытывает существенные колебания вследствие теплообмена с воздухом в выработке.

Данный вывод указывает на возможность применения еще одного метода расчета фактической геотермической ступени для условий шахтного поля для Березовского рудника 1 РУ ОАО «Беларуськалий». Идея предлагаемого в работе метода заключается в том, чтобы исключить влияние фактора теплообмена воздуха с массивом путем прямых измерений температуры в термометрических шпурах, пробуренных на вентиляционных штреках рудника. Данные исследований позволят не только определить геотермическую ступень, но также провести анализ пространственного (вертикального и латерального) изменения температуры породного массива в пределах шахтного поля, а также повысить точность прогноза температуры в рабочих зонах подготовительных и очистных забоев.

По данным многочисленных исследований, изменение температуры пород с глубиной характеризуется незначительными отклонениями от линейной зависимости, что обычно объясняется тепловыми аномалиями, вызванными работой оборудования и различием теплопроводности пород. Наряду с местными тепловыми аномалиями, наблюдаются и аномальные термоявления (зоны местного увеличения температуры породного массива), вызванные воздействием водоносных горизонтов [14–16]. Различные тектонические нарушения также приводят к искажению теплового потока, поступающего из недр Земли. В любом регионе встречаются структуры, влияние которых на тепловое поле не всегда поддается простому решению. В таких случаях это влияние изучается моделированием и геотермическим исследованием районов [17, 18]. Это в меньшей степени справедливо для исследуемого в статье случая месторождения в осадочно-породном бассейне, однако несмотря на это исследование вопроса о величине латеральной изменчивости температуры пород имеет определенный научный интерес.

Согласно представленным в литературе [19] термометрическим исследованиям верхних слоев пород

для Припятского прогиба в Республике Беларусь, плотность теплового потока в окрестности г. Солигорск составляет 40–45 мВт/м². На рис. 1 представлена кривая геотермической ступени в окрестности г. Солигорск.

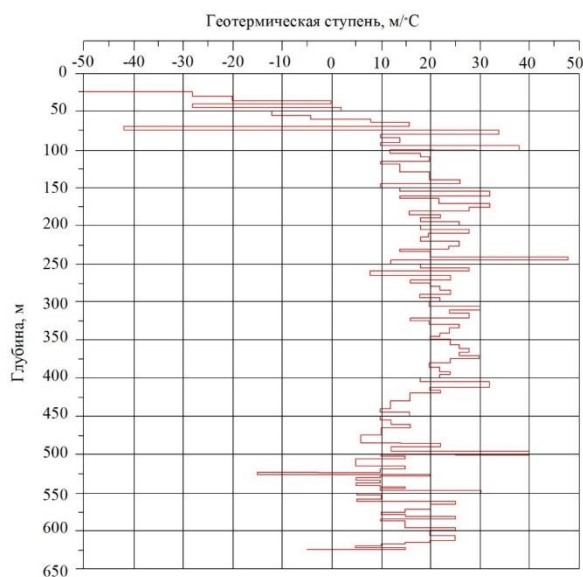


Рис. 1. Кривая геотермической ступени по скважине № 966 в окрестностях г. Солигорск

Fig. 1. Geothermal step plot for well no. 966 in the vicinity of Soligorsk city

В вышележащих слоях происходит монотонное возрастание значения геотермической ступени с глубиной. Залегающая ниже зоны пресных вод глинистомергельная толща является водоупором. В данном интервале геотермическая ступень принимает значения близкие к 27 м/°C в зависимости от наличия пропластков разного литологического состава. Ниже залегают каменная соль, обладающая высокой теплопроводностью, при этом геотермическая ступень в данной зоне снижается до значений 30 м/°C. При этом полученные данные не соответствуют данным температурных съемок на действующих рудниках ОАО «Беларуськалий». Для уточнения сведений о фактических тепловых свойствах пород в рамках рассматриваемой работы выполнено исследование температуры массива горных пород непосредственно на Березовском руднике 1 РУ.

Сведения об объекте исследования

Исследуемый в работе рудник относится к Старобинскому месторождению калийных солей. Упоминание о геотермической ступени месторождения приведено на карте геотермического градиента в верхней части земной коры на территории СССР [20]. Согласно карте, геотермическая ступень в окрестностях Минской области не превышает 66,6 м/°C.

Шахтное поле Березовского рудника 1 РУ расположено в центральной впадине северо-западной краевой части Шатилковской депрессии Припятского прогиба. Центральная впадина обладает асимметричной синклиальной формой. В структурном отноше-

нии поле относится к южному крылу центральной впадины. Залегание характеризуется падением продуктивных пластов в северо-восточном направлении. Угол падения составляет $1^{\circ}30'$. При этом рассматриваемый в работе III калийный горизонт относится к пластовой залежи моноклиналиного залегания, угол падения варьируется от 1° до 3° .

Район осложнён небольшими грядами и холмами при этом в целом обладает равнинным рельефом. Абсолютные отметки располагаются в диапазоне от 138 до 173 м.

Промышленный пласт рудника представлен каменной солью, сильвинитом и карналлитом, которые переслоены мергелями, алевролитами, доломитами. Исследуемый горизонт сложен тремя пластами:

- 1) верхним сильвинитовым (забалансовым);
- 2) глинисто-карналлитовым;
- 3) нижним сильвинитовым (промышленным).

Проведение эксперимента

В рамках работы проведены комплексные исследования температуры массива для рабочих зон подготовительных и очистных забоев Березовского рудника 1 РУ. Замеры температуры массива выполнялись в подготовительных и очистных забоях (рис. 2). Для решения задачи выполнено бурение шпуров в разных участках шахтного поля (рис. 3). Глубина бурения определена с учетом теплового влияния воздушных потоков на массив в программно-вычислительном комплексе «Аэросеть» на основе модели сопряженного теплообмена, описанной в [21]. По результатам

моделирования при теплообмене воздуха с температурой $+40^{\circ}\text{C}$ и стенок массива в течение 6 месяцев глубина тепловых возмущений не превышает 2 м. Под значимыми тепловыми возмущениями принималось изменение температуры на $0,1^{\circ}\text{C}$. На основании полученных данных минимальная глубина шпуров должна составлять 3 м. Предлагаемый запас позволит избежать влияния температуры воздуха на массив и получить достоверные значения температуры нетронутого массива.

Замер выполнялся не ранее чем через 48 часов после бурения для исключения тепловых возмущений от бурильных установок. В качестве средства измерения использовался одноканальный термометр testo 925 с подключенным высокоточным погружным зондом testo, с диапазоном измерений $-35...80^{\circ}\text{C}$ и абсолютной погрешностью до $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. В исследовании участвовали рабочие зоны подготовительных и очистных забоев (рис. 3). Для замера в пробуренный шпур помещался зонд. Корректным считался замер, при котором зонд погружен на всю глубину шпура, а показания прибора имеют неизменные значения в течение 30 минут. Время проведения одного замера составляло от 30 до 45 минут.

На рис. 3 указаны точки, где выполнялись замеры. Для исследования приняты рабочие зоны, рассредоточенные по разным частям шахтного поля. Это позволяет в перспективе получить наиболее достоверную картину о латеральной изменчивости температуры в пределах шахтного поля.

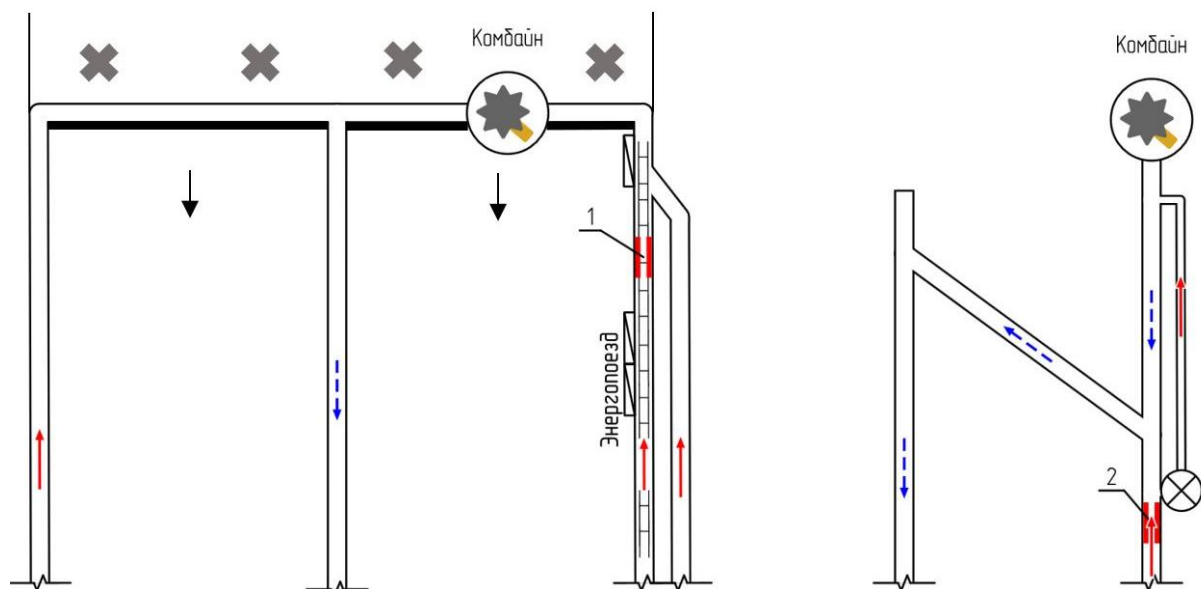


Рис. 2. Схема расположения замерных точек для очистных и подготовительных забоев (1 – конвейерный штрек лавы, 2 – транспортная выработка)

Fig. 2. Measurement points layout for breakage face and development heading (1 – belt entry longwall, 2 – haulage working)

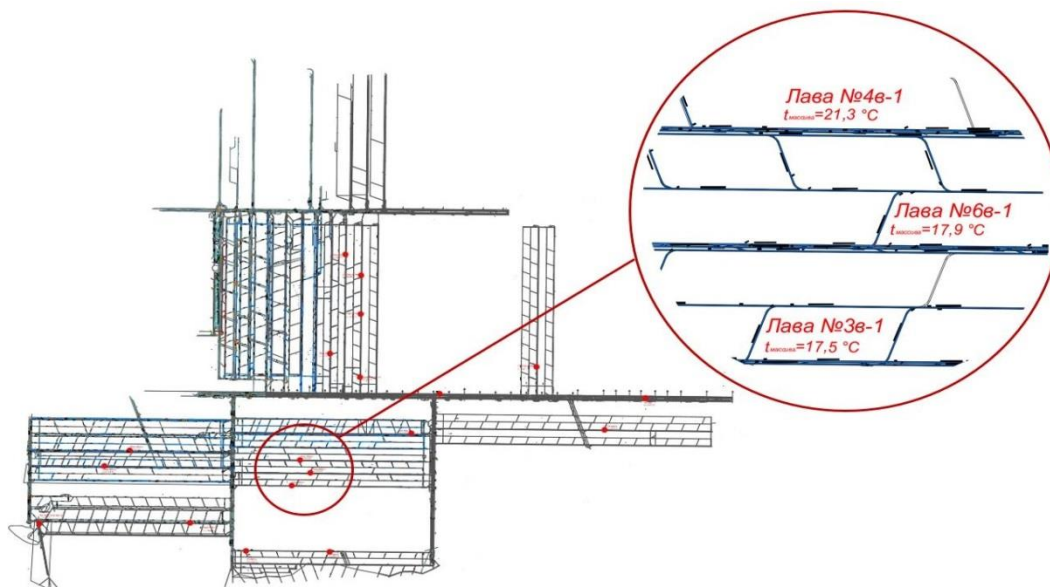


Рис. 3. Расположение замерных точек в пределах шахтного поля Березовского рудника 1 РУ
 Fig. 3. Measurement points layout within mine field of Berezovsky mine

Обработка результатов

Согласно общим представлениям [3] зависимость температуры массива горных пород от глубины имеет линейный характер (температура горных пород тем выше, чем больше глубина ведения горных работ).

На основании выполненных замеров построен график линейной аппроксимации температуры массива для подготовительных и очистных забоев как функции глубины ведения горных работ (рис. 4). Выбор линейной аппроксимации обусловлен тем, что на практике изменение температуры с глубиной чаще всего реализуется по линейной или кусочно-линейной зависимости [3].

Линейная аппроксимация производилась методом наименьших квадратов. Значения температур массива, полученные в большинстве очистных забоев лав, существенно превышают значения температур, полученных в подготовительных забоях (обозначены на рис. 4 как ПК). Коэффициент детерминации $R^2=0,401$, что говорит о слабой корреляции экспериментальных данных с вычисленной линейной аппроксимацией. Это связано с существенными тепловыми возмущениями от работающего оборудования в конвейерных штреках лав (привод конвейера, энергопоезд).

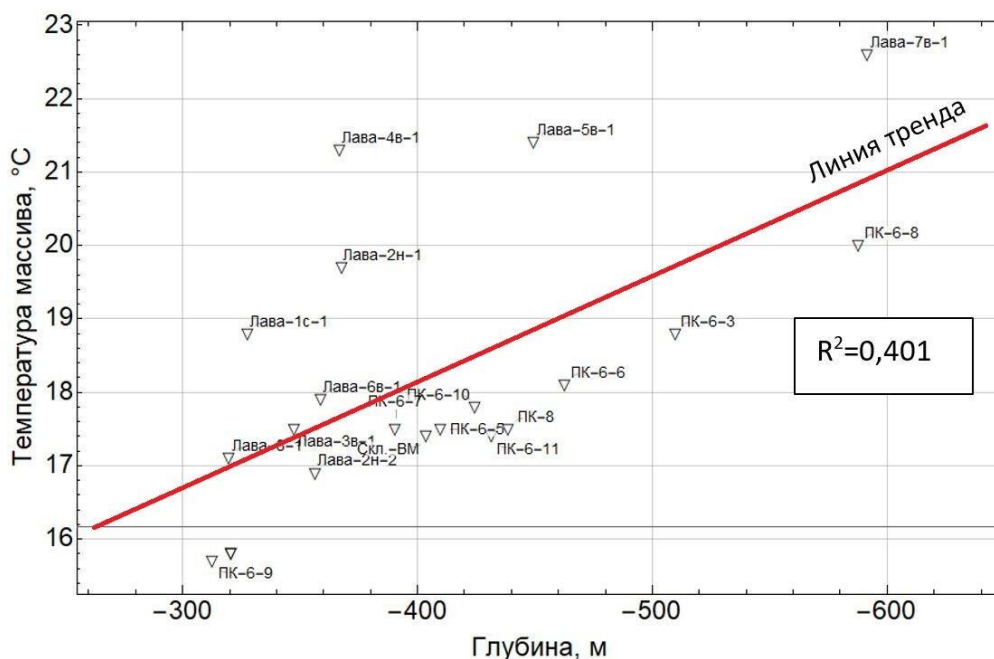


Рис. 4. График линейной аппроксимации температуры массива в зависимости от глубины ведения работ для подготовительных и очистных забоев

Fig. 4. Linear approximation of the temperature-depth relation for breakage face and development heading

Для исключения теплового возмущения от электрического оборудования построен график линейной аппроксимации температуры массива в зависимости от глубины ведения работ, учитывающий только подготовительные забои (рис. 5). Полученное значение коэффициента детерминации свидетельствует о высокой связи замеренных данных и линейной аппроксимации.

Полученная аппроксимирующая зависимость температуры массива от глубины имеет следующий вид:

$$t_{\Pi} = 11,0 - 0,015 \cdot z, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2)$$

Абсолютное отклонение аппроксимирующей зависимости от экспериментальных данных составляет 0,64 °С, среднее отклонение – 0,2 °С.

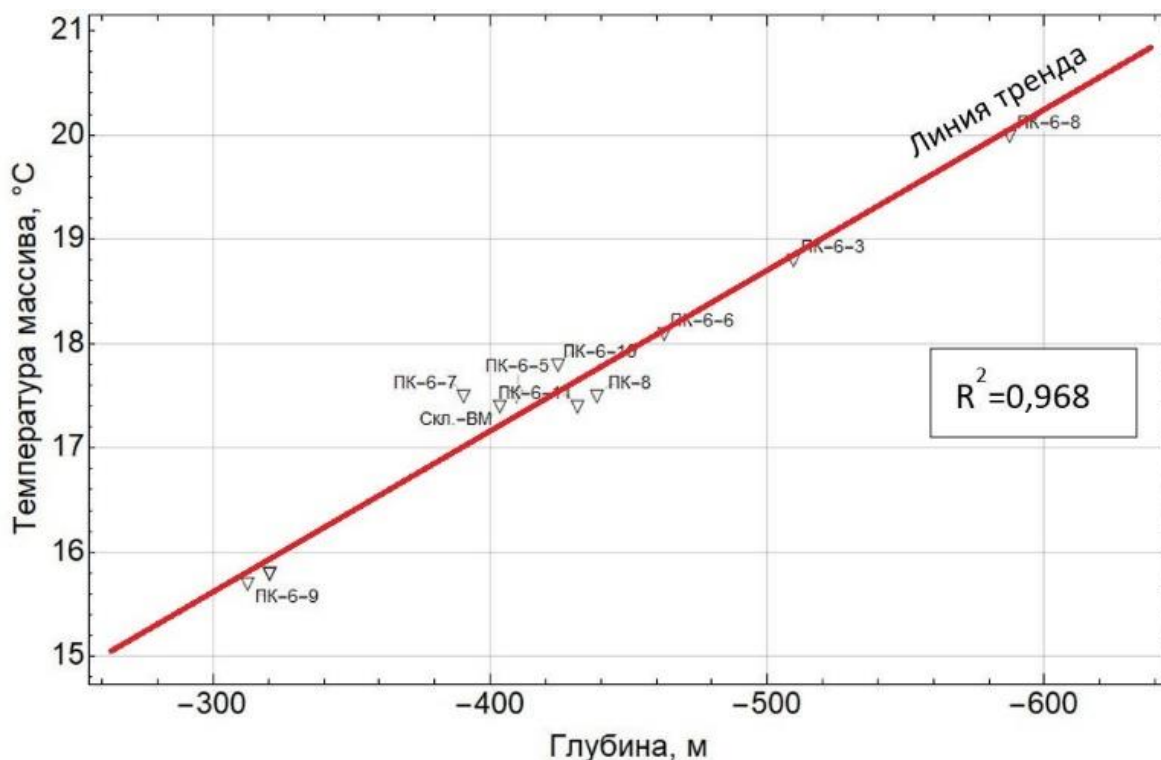


Рис. 5. График линейной аппроксимации температуры массива в зависимости от глубины ведения работ для подготовительных забоев

Fig. 5. Linear approximation of the temperature-depth relation for development heading

По результатам замеров в подготовительных забоях выполнен расчет геотермической ступени для Березовского рудника 1 РУ. В табл. 2 представлено сравнение полученного значения геотермической ступени со значе-

нием из «Инструкции по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания рудников Старобинского месторождения» 2014 г., а также со значениями из других литературных источников.

Таблица 2. Сравнение геотермических ступеней

Table 2. Comparison of geothermal steps

| Геотермическая ступень, м°С/Geothermal step, m°С | | | |
|---|---|--|--|
| Согласно инструкции по расчету требуемого количества воздуха (формула (1)) Value determined according to the instruction for calculating of the required amount of air (formula (1)) | Согласно результатам термометрии по скважине № 966 в окрестностях г. Солигорск Value determined from results of thermometry in the well no. 966 near Soligorsk | Согласно карте геотермического градиента в верхней части земной коры на территории СССР Value from the map of the geothermal stage in the upper part of the earth's crust in the USSR | Согласно данным измерений в шпурах (формула (2)) Value determined according to the measured data in short holes (formula (2)) |
| 47,6 | 30,0 | Менее 66,6/Less than 66,6 | 64,9 |

Из сравнения видно, что полученное значение геотермической ступени имеет более высокие значения, чем рассчитанное по формуле (1) из инструкции и полученное по данным термометрии по скважине № 966. При этом полученное значение вполне соответствует данным [17].

Кроме того, в рамках исследования построено распределение температур для горизонтального раз-

реза шахтного поля на глубине –391 м в координатах (x; y) (рис. 6).

В результате анализа получена зависимость изменения температуры массива от пространственных координат:

$$t = 8,03 + 0,0000046 \cdot x + 0,00018 \cdot y - 0,011 \cdot z,$$

где x, y, z – пространственные координаты.

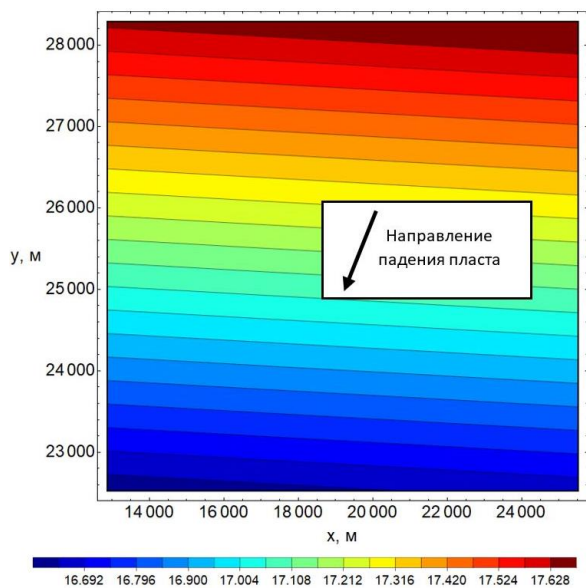


Рис. 6. Контурная карта температуры массива для глубины –391 м

Fig. 6. Contour map of the rock mass temperature for the depth of –391 m

Абсолютное отклонение полученной зависимости от экспериментальных данных равняется $0,58\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднее отклонение – $0,22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Величина коэффициента детерминации R^2 равна $0,97$, что свидетельствует о высокой связи замеренных данных и линейной аппроксимации.

Полученное поле температур зависит от всех трех координат, что указывает на наличие латеральной изменчивости, которая не может быть объяснена исключительно падением пласта. Это говорит о несправедливости классической гипотезы об идеально однородном поле в пределах рассматриваемой высотной отметки. Все это происходит по причине того, что в реальных условиях тепловой поток, теплопроводность пород, температура на границе геотермозоны различны в разных местах, а сама поверхность геотермозоны не является геометрически правильной. Это выражается в различии температур массива на одинаковых глубинах и, как следствие, неоднородности величины геотермической ступени в пределах одной глубины. Кроме того, при расчетах игнорируется влияние физико-химических и физико-механических процессов, происходящих в недрах Земли. К первым относятся химические реакции, ко вторым – деформация пород, перемещение геологических тел, конвективный перенос тепла.

Выводы

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подвигни К.А. Анализ источников тепловыделения глубоких горизонтов угольных шахт // 6-я Международная научно-практическая конференция Инновационные перспективы Донбасса. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. – С. 60–75.

1. Величина геотермической ступени, полученная в результате замеров в разных частях шахтного поля Березовского рудника 1 РУ, составляет $64,9\text{ м}/^{\circ}\text{C}$, что выше данных, описанных в литературе ($\sim 30\text{--}40\text{ м}/^{\circ}\text{C}$), но в то же время согласуется с данными карты геотермического градиента в верхней части земной коры на территории СССР.
2. Температуры массива в районе очистных забоев в среднем имеют более высокие значения, чем температуры массива подготовительных забоев при одинаковых глубинах. Это свидетельствует о нагреве воздуха от работающего электрического оборудования, что влечет за собой нагрев породного массива в среднем на величину около $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для получения достоверных результатов температуры нетронутого массива в зоне интенсивного ведения очистных работ необходимо увеличить глубину бурения шпуров. Для реализации данной цели рекомендуется провести дополнительное моделирование теплообменных процессов в очистных забоях.
3. На основании полученных результатов определена функция зависимости температуры массива для III калийного горизонта. Построены температурные карты шахтного поля. Полученные данные позволят прогнозировать температуры воздуха в рабочих зонах, проектировать системы вентиляции и кондиционирования воздуха в неблагоприятных микроклиматических условиях.
4. Температура массива в пределах рассмотренной высотной отметки обладает латеральной изменчивостью. Неоднородность температурного поля вызвана изменчивостью теплопроводности пород по высоте и, как следствие, изменчивостью локальных тепловых потоков.
5. В целом результаты работ показывают, что перспективным способом определения геотермической ступени для эксплуатируемых рудников, а также пространственного распределения температур является проведение экспериментальных исследований температуры массива в шпурах, пробуриваемых в различных участках шахтного поля. Данный подход позволяет устанавливать закономерности формирования и распределения температурного поля, выявлять вариации и аномалии, которые невозможно отследить при использовании расчетных формул, представленных в литературе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от «29» декабря 2020 г.

2. Кормициков Д.С., Попов М.Д. Нормализация теплового режима глубоких залежей рудника «Таймырский» до момента ввода системы кондиционирования // Горное эхо. – 2019. – № 2. – С. 92–96.
3. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2019. – 247 с.

4. Щербань А.Н., Кремнев С.А., Журавленко В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт. – М.: Изд-во «Недра», 1977. – 359 с.
5. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2020. – V. 20. – № 100760.
6. Влияние условий труда на функциональное состояние персонала работников, занятых на добыче нефти термощахтным способом / О.Ю. Устинова, В.Г. Костарев, В.Б. Алексеев, Е.М. Власова, А.Е. Носов, А.В. Зайцев, Л.Ю. Левин // *Гигиена и санитария*. – 2020. – Т. 99. – № 11. – С. 1222–1229.
7. Wüst G. Thermometric measurement of depth // *The International Hydrographic Review*. – 1933. – V. 10. – № 1. – P. 28–49.
8. Brake D.J. Mine ventilation: a practitioner's manual. – Brisbane: Mine Ventilation. Australia Publ., 2012. – 686 p.
9. Powell R., Holland T. Optimal geothermometry and geobarometry // *American Mineralogist*. – 1994. – V. 79. – № 1–2. – P. 120–133.
10. Lasaga A.C. Geospeedometry: an extension of geothermometry // *Kinetics and equilibrium in mineral reactions*. – New York: Springer Publ., 1983. – P. 81–114.
11. Особенности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников / В.Н. Карелин, А.В. Кравченко, Л.Ю. Левин, Б.П. Казаков, А.В. Зайцев // *Горный журнал*. – 2013. – № 6. – С. 65–68.
12. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways // *International Journal of Mining and Geological Engineering*. – 1986. – V. 4. – № 3. – P. 165–195.
13. A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems / T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz, J. Fourmigue // *Solar Energy*. – 2017. – V. 153. – P. 628–654.
14. Черемский Г.А. Прикладная геотермия. – Л.: Изд-во «Недра», 1977. – 224 с.
15. Тепловое поле на северо-востоке Украины / О.В. Арясова, В.В. Гордиенко, И.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя // *Доповіді Національної академії наук України*. – 2011. – № 5. – С. 113–118.
16. Shangxian Y., Wen L. Geothermic mine water forming mechanism and integrated preventive technologies in Wutongzhuang Mine Area, China // *An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges* / Eds. W. Sui, Ya. Sun, Ch. Wang. – China, Xuzhou: University of Mining and Technology Press, 2014. – P. 666–670.
17. Геотермические условия осадочно-породных бассейнов земного шара / А.Н. Резников, С.М. Астахов, С.А. Резников, Д.А. Маллак // *Геология нефти и газа*. – 2013. – № 4. – С. 49–56.
18. Jessop A.M., Ghomshei M.M., Drury M.J. Geothermal energy in Canada // *Geothermics*. – 1991. – V. 20. – № 5–6. – P. 369–385.
19. Дубаневич М.А., Зуй В.И., Мартынова О.А. Геотермический Атлас Беларуси. – Минск: Национальная библиотека Беларуси, 2018. – 89 с.
20. Макаренко Ф.А., Поляк Б.Г., Сугробов В.М. Конвективное перераспределение тепла в пределах земной коры. – М.: Изд-во «Наука», 1970. – 70 с.
21. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – № 2. – С. 154–161.

Поступила 17.06.2022 г.

Информация об авторах

Зайцев А.В., доктор технических наук, заведующий сектором отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

Бородавкин Д.А., младший научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

Бублик С.А., младший научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

Агеева К.М., инженер отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН.

UDC 622.253.35

STUDY OF ROCK TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE BEREZOVSKY MINE FIELD OF BELARUSKALI COMPANY

Artem V. Zaitsev¹,
aerolog.artem@gmail.com

Dmitry A. Borodavkin¹,
borodavkin.dmitriy@gmail.com

Sergey A. Bublik¹,
serega-bublik@mail.ru

Ksenia M. Ageeva¹,
kmageeva@gmail.com

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

The relevance. An increase in the depth of mining leads to a natural growth in the temperature of rocks and air temperature in the working areas. The most effective measure to reduce air temperatures is the use of air conditioning systems. The availability of data on the thermal properties of rocks at the stage of pre-design study makes it possible to avoid unreasonable reserves of refrigeration equipment capacity, reducing capital and operating costs.

The main aim of the research is to study rock temperature distribution in the Berezovsky mine field of Belaruskali company to determine a geothermal step.

Object of the research is the Berezovsky mine field of Belaruskali company.

Methods of the study include experimental measurements of the temperature of rocks in boreholes drilled in mine workings at different depths, statistical data processing, and approximation of the temperature field as a function of spatial coordinates.

Results. The temperatures of the virgin rock mass are investigated, an approximating dependence of the expected temperature of rocks at a given depth is obtained. The value of the geothermal step obtained in the course of the study was 64,9 m/°C. This value exceeds the values that were calculated according to the instructions for calculating the required amount of air for the mine and the previous data on the well thermometry. At that, the obtained value corresponds to the data on the map of the geothermal stage in the upper part of the earth's crust in the USSR. The study of rock mass temperature for horizontal section of the mine field shows that temperature depends significantly on all three coordinates. This indicates the presence of lateral variability of the temperature field, which cannot be explained solely by seam gradient.

Key words:

Mine, coefficient of determination, geothermy, geothermal step, thermal and humidity survey of working areas, rock mass temperature, thermal conditions.

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the agreement on the State task no. 075-03-2021-374, «29» December 2020.

REFERENCES

- Podvigin K.A. Analiz istochnikov teplovydeleniya glubokikh gorizontov ugolnykh shakht [Analysis of sources of heat release in deep horizons of coal mines]. 6-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. *Innovatsionnye perspektivy Donbassa* [6th International Scientific and Practical Conference. Innovative Prospects of Donbass]. Donetsk, Donetsk National Technical University Publ., 2020. pp. 60–75.
- Kormshchikov D.S., Popov M.D. Normalizatsiya teplovogo rezhima glubokikh zalezhey rudnika «Taymyrskiy» do momenta vvoda sistemy konditsionirovaniya [Normalization of the thermal regime of the deep deposits of the Taimyrsky mine until the commissioning of the air conditioning system]. *Gornoe echo*, 2019, no. 2, pp. 92–96.
- Zaitsev A.V. *Nauchnye osnovy rascheta i upravleniya teplovym rezhimom podzemnykh rudnikov*. Diss. Dokt. nauk [Scientific bases of calculation and management of thermal regime of underground mines. Dr. Diss.]. Perm, 2019. 247 p.
- Shcherban A.N., Kremnev S.A., Zhuravlenko V.Ya. *Rukovodstvo po regulirovaniyu teplovogo rezhima shakht* [Guidelines for regulating the thermal regime of mines]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 359 p.
- Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 20, no. 100760.
- Ustinova O.Yu., Kostarev V.G., Alekseev V.B., Vlasova E.M., Nosov A.E., Zaitsev A.V., Levin L.Yu. The impact of working conditions on the functional state of employees in thermoshift oil production. *Hygiene and Sanitation*, 2020, vol. 99, no. 11, pp. 1222–1229. In Rus.
- Wüst G. Thermometric measurement of depth. *The International Hydrographic Review*, 1933, vol. 10, no. 1, pp. 28–49.
- Brake D.J. *Mine ventilation: a practitioner's manual*. Brisbane, Mine Ventilation. Australia Publ., 2012. 686 p.
- Powell R., Holland T. Optimal geothermometry and geobarometry. *American Mineralogist*, 1994, vol. 79, no. 1–2, pp. 120–133.
- Lasaga A.C. *Geospeedometry: an extension of geothermometry. Kinetics and equilibrium in mineral reactions*. New York, Springer Publ., 1983. pp. 81–114.
- Karelin V.N., Kravchenko A.V., Levin L.Yu., Kazakov B.P., Zaitsev A.V. Features of forming microclimatic conditions in mining excavations of deep mines. *Gorny zhurnal*, 2013, no. 6, pp. 65–68. In Rus.
- McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 1986, vol. 4, no. 3, pp. 165–195.

13. Esence T., Bruch A., Molina S., Stutz B., Fourmigue J. A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems. *Solar Energy*, 2017, vol. 153, pp. 628–654.
14. Cheremenskiy G.A. *Prikladnaya geotermiya* [Applied geothermy]. Leningrad, Nedra Publ., 1977. 224 p.
15. Aryasova O. V., Gordienko V.V., Gordienko I.V., Zavgorodnyaya O.V. Heat field on the north-east of Ukraine. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2011, no. 5, pp. 113–118. In Rus.
16. Shangxian Y., Wen L. Geothermic mine water forming mechanism and integrated preventive technologies in Wutongzhuang Mine Area, China. *An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges*. Eds. W. Sui, Ya. Sun, Ch. Wang. China, Xuzhou, University of Mining and Technology Press Publ., 2014. pp. 666–670.
17. Reznikov A. N., Astahov S.M., Reznikov S.A., Mallak D.A. Geothermal regime of the world sedimentary basins. *Oil and gas geology*, 2013, no. 4, pp. 49–56. In Rus.
18. Jessop A.M., Ghomshei M.M., Drury M.J. Geothermal energy in Canada. *Geothermics*, 1991, vol. 20, no. 5–6, pp. 369–385.
19. Dubanevich M.A., Zuy V.I., Martynova O.A. *Geotermicheskiy Atlas Belarusi* [Geothermal Atlas of Belarus]. Minsk, National Library of Belarus Publ., 2018. 89 p.
20. Makarenko F.A., Polyak B.G., Sugrobov V.M. *Konvektivnoe pereraspredelenie tepla v predelakh zemnoy kory* [Convective redistribution of heat within the Earth's crust]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 70 p.
21. Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations. *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 2, pp. 371–378.

Received: 17 June 2022.

Information about the authors

Artem V. Zaitsev, Dr. Sc., head of the sector of the department, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Dmitry A. Borodavkin, post-graduate student, junior researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Sergey A. Bublik, post-graduate student, junior researcher, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Ksenia M. Ageeva, engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.