

УДК 622.276:551.584

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2018

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ФАКТОРОВ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ В НЕФТЯНОЙ ШАХТЕ

Ю.А. Клюкин, М.А. Семин, А.В. Зайцев

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (614007, Россия, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

THE EXPERIMENTAL STUDY OF MICROCLIMATIC CONDITIONS AND FACTORS OF THEIR FORMATION IN THE OIL MINE

Yuri A. Klyukin, Mikhail A. Semin, Artem V. Zaitsev

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78 Sibirskaya st., Building A, Perm, 614007, Russian Federation)

Получена / Received: 27.07.2018. Принята / Accepted: 03.09.2018. Опубликовано / Published: 28.09.2018

Ключевые слова:

микроклиматические условия, нефтяная шахта, термощахтный способ добычи, вентиляция шахт, экспериментальная съемка, температурно-влажностная съемка, уклонный блок, теплообмен, породный массив, буровая галерея, добыча нефти, высоковязкая нефть, температура, относительная влажность, классификация.

Описаны результаты экспериментального исследования закономерностей формирования теплового режима горных выработок нефтяных шахт на примере нефтяной шахты № 1 НШУ «Яреганефть» ООО «ЛУКОЙЛ-Ками». В данном случае тепловой режим горных выработок во многом определяется уникальной технологией извлечения нефти термощахтным способом, применяемой на Ярегском месторождении высоковязкой нефти и подразумевающей закачку в пласт перегретого водяного пара, приводящую к последующему нагреву нефтяного пласта и содержащейся в нем нефти. Проведенные измерения микроклиматических параметров в выработках шахты (температуры, относительной влажности, скорости воздуха) использованы для разработки компьютерной модели вентиляционной сети шахты в аналитическом комплексе «АэроСеть» и дальнейшего анализа распределения микроклиматических параметров на данной модели. В ходе экспериментальной съемки также исследована эффективность различных горнотехнических мероприятий, применяемых в настоящее время на нефтяной шахте и позволяющих снизить влияние тяжелого теплового режима в выработках нефтяных шахт. Проведенные исследования позволили выявить факторы, формирующие микроклиматические условия в различных горных выработках шахты: в главных воздухоподающих и вентиляционных выработках, во вскрывающих и подготовительных выработках, а также в технологических камерах. Описаны наиболее существенные процессы, являющиеся причиной нестационарности теплового режима горных выработок нефтяной шахты. Проведена классификация данных факторов в зависимости от направленности их теплового воздействия, от местонахождения источника и от конечного механизма теплоотдачи. Основным итогом работы является представленная в графическом виде классификация факторов изменения микроклиматических параметров воздуха в нефтяной шахте № 1. Данная классификация является основой для разработки математических моделей нестационарных теплообменных процессов, протекающих в нефтяных шахтах.

Key words:

microclimatic conditions, oil mine, thermal mining oil recovery, ventilation of mines, experimental survey, temperature and humidity survey, slope block, heat exchange, rock mass, drilling gallery, oil production, high viscosity oil, temperature, relative humidity, classification.

Patterns of formation of the thermal regime of the mine workings in oil mines are experimentally studied. Results are described on example of oil mine No. 1 of the Oil Mine Control Unit Yareganefth of LUKOIL-Komi LLC. In the example given the thermal regime of mine workings is largely determined by the unique technology of oil extraction by the thermal mining method used in the Yaregskoye field of high-viscosity oil and involving the injection of superheated water vapor into the reservoir. That leads to subsequent heating of an oil reservoir and oil contained. Measurements of microclimatic parameters in mine workings (temperature, relative humidity, air velocity) were used to develop a computer model of the mine ventilation network in the AeroSet analytical complex and further analysis of the distribution of microclimatic parameters on this model. During the experimental survey the effectiveness of various mining engineering measures currently used at the oil mine and reducing the influence of the heavy thermal regime in the workings of oil mines was also investigated. The research conducted allowed to identify factors that form microclimatic conditions in various mine workings such as in the main air supply and ventilation workings, in the opening and development workings, and also in the process chambers. The most significant processes that caused nonstationarity of the thermal regime of the mine workings of the oil mine are described. Classification of these factors was carried out depending on the direction of their thermal effect, on the location of the source and on the final mechanism of heat transfer. Classification in terms of the microclimatic parameters of air in oil mine No. 1 presented in graphics is the main result of the work. This classification is the basis for the development of mathematical models of unsteady heat and mass transfer processes occurring in oil mines.

Клюкин Юрий Андреевич – ведущий инженер (тел.: +007 342 216 54 92, e-mail: aeroyuri@gmail.com).

Семин Михаил Александрович – кандидат технических наук, научный сотрудник (тел.: +007 342 216 54 92, e-mail: mishkasemin@gmail.com). Контактное лицо для переписки.

Зайцев Артем Вячеславович – кандидат технических наук, заведующий сектором (тел.: +007 342 216 54 92, e-mail: aerolog.artem@gmail.com).

Yuri A. Klyukin (Author ID in Scopus: 57188969203) – Leading Engineer (tel.: +007 342 216 54 92, e-mail: aeroyuri@gmail.com).

Mikhail A. Semin (Author ID in Scopus: 56462570900) – PhD in Engineering, Research Fellow (tel.: +007 342 216 54 92, e-mail: mishkasemin@gmail.com). The contact person for correspondence.

Artem V. Zaitsev – PhD in Engineering, Head of the Sector (tel.: +007 342 216 54 92, e-mail: aerolog.artem@gmail.com).

Введение

Традиционно основной задачей систем вентиляции шахт и рудников является обеспечение количества воздуха, необходимого для поддержания в подземных горных выработках взрывобезопасной и пригодной для дыхания атмосферы [1, 2]. В настоящее время с внедрением все более высокопроизводительной техники и технологий, с вовлечением в отработку все более труднодоступных и глубокозалегающих запасов все острее встает проблема создания благоприятных микроклиматических условий, позволяющих безопасно для здоровья вести подземные горные работы, обеспечивая при этом конкурентоспособную себестоимость продукции и производительность труда [3–5]. В этих условиях на системы вентиляции горных выработок дополнительно возлагаются функции систем кондиционирования воздуха, служащих для обеспечения и поддержания комфортных и безопасных микроклиматических условий в подземных рабочих зонах [3, 6–9].

Проблема обеспечения безопасных микроклиматических условий труда является актуальной применительно к нефтяным шахтам Ярегского месторождения высоковязкой нефти, разрабатываемого с использованием термощахтного способа добычи [10–12]. Термощахтный способ добычи высоковязкой нефти подразумевает закачку теплоносителя (перегретого водяного пара) в нефтяной пласт через вертикальные или наклонные нагнетательные скважины. За счет фильтрации закачанного в пласт теплоносителя происходит постепенный прогрев нефтяного пласта. При прогреве содержащейся в пласте нефти ее вязкость падает на несколько порядков, вследствие чего нефть перетекает под действием сил гравитации в наклонные добывающие скважины, пробуренные из выработок буровой галереи нефтяного пласта (см. рис. 1).

Высокая температура закачиваемого в пласт пара (более +100 °С) приводит к существенному повышению начальных температур породного массива (пласта) и содержащейся в нем нефти. Это, в свою очередь, ведет к ухудшению микроклиматических параметров в атмосфере горных выработок нефтяных шахт, превышению предельно допустимого по «Правилам безопасности...» значения температуры воздуха в

выработках [13, 14]. При этом тепловой режим горных выработок является одним из производственных факторов и должен в первую очередь обеспечивать безопасность труда, исключать возникновение несчастных случаев, профессиональных заболеваний и способствовать сохранению состояния здоровья рабочих [15].

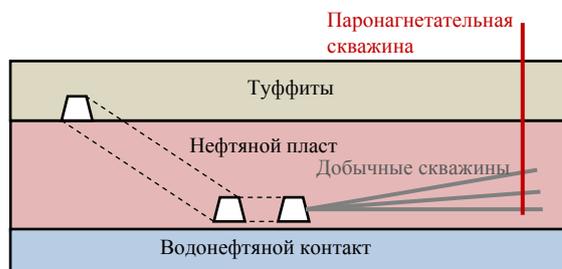


Рис. 1. Принципиальная схема расположения скважин и выработок уклонного блока нефтяной шахты при подземно-поверхностной схеме разработки нефтяного пласта термощахтным способом, вертикальный разрез

Данный факт обуславливает актуальность настоящей работы, посвященной экспериментальному исследованию закономерностей формирования теплового режима горных выработок нефтяных шахт на примере нефтяной шахты № 1 НШУ «Яреганефть» ООО «ЛУКОЙЛ-Коми».

Общие сведения о вентиляции шахты

Шахтное поле нефтяной шахты № 1 НШУ «Яреганефть» вскрыто тремя стволами: подъемный ствол, вентиляционный ствол и вентиляционный ствол № 2. Проветривание горных выработок нефтяной шахты № 1 НШУ «Яреганефть» осуществляется всасывающим способом по центрально-отнесенной схеме [16]. Подъемный и вентиляционный стволы предназначены для подачи свежего воздуха в подземные горные выработки и оборудованы калориферными установками. Вентиляционный ствол № 2 служит для выдачи отработанного воздуха из шахты. Ствол соединен с вентиляционным каналом, в котором установлена главная вентиляторная установка ВЦД-31,5.

Основной тракт движения воздуха по нефтяной шахте может быть описан следующей последовательностью горных выработок:

- подъемный ствол и вентиляционный ствол № 1;
- главные воздухоподающие выработки туффитового горизонта;

- ходок;
- эксплуатационная (буровая) галерея;
- уклон;
- главные вентиляционные выработки туффитового горизонта;
- вентиляционный ствол № 2.

На рис. 2 представлена компьютерная модель вентиляционной сети нефтяной шахты № 1, построенная в аналитическом комплексе «АэроСеть» [17]. Желтым цветом обозначены выработки туффитового горизонта, синим – выработки уклонных блоков, зеленым и серым – вертикальные выработки (стволы, скважины).

Результаты экспериментальной съемки

Предметом исследования при проведении экспериментальной съемки являлись микроклиматические параметры воздуха в горных выработках различного типа: главных воздухоподающих и вентиляционных; вскрывающих и подготовительных, а также технологических камерах. Измеряемые параметры:

- 1) температура воздуха (термовлагомер Fluke-971),
- 2) относительная влажность воздуха (термовлагомер Fluke-971),
- 3) средняя по сечению скорость движения воздушной струи (анемометр АПР-2),
- 4) сечение горных выработок (лазерный дальномер Leica Disto D2),
- 5) температура поверхностей горных выработок и прочих источников теплопоступлений (тепловизор Flir SC660).

Температурно-влажностные и воздушно-депресссионные съемки проводились Горным институтом УрО РАН при участии авторов работы. На рис. 3 представлены обобщенные результаты температурно-влажностной съемки, проведенной в 2017 г. Градиентной заливкой показано распределение температур во всей вентиляционной сети шахты. Синий цвет соответствует температурам воздуха +26 °С и ниже. На рис. 3 также показана интенсивность тепловыделений на отдельных уклонных блоках шахты (выделены пунктирной линией).

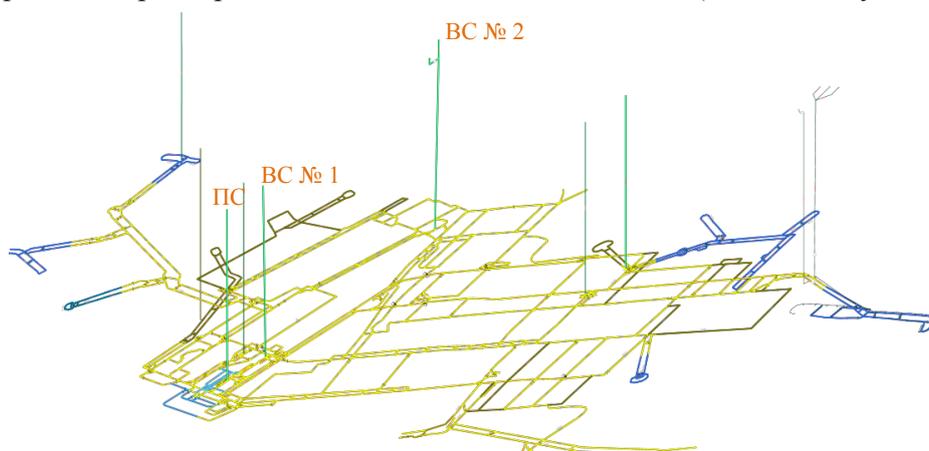


Рис. 2. Вентиляционная сеть нефтяной шахты № 1:
ПС – подъемный ствол, ВС – вентиляционный ствол

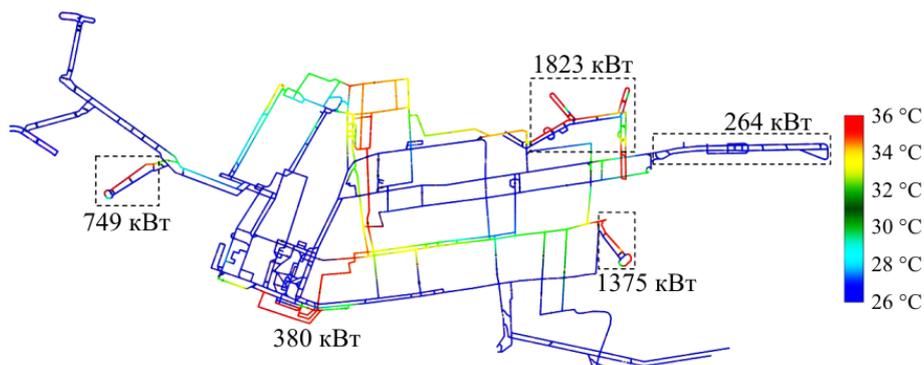


Рис. 3. Распределение температуры воздуха в вентиляционной сети нефтяной шахты № 1, температурно-влажностная съемка

Тепломассообменные процессы, протекающие при движении воздуха по воздухоподающим стволам нефтяных шахт, не имеют ярко выраженной специфики, связанной с применяемой системой разработки, и характеризуются несущественным нагревом вследствие гидростатического сжатия (1–2 °С) и теплообменом с породным массивом, имеющим на данных глубинах температуру от +5 до +10 °С.

Главные воздухоподающие выработки туфитового горизонта характеризуются монотонным изменением температуры воздуха по пути движения от воздухоподающих стволов к уклонным блокам. При этом холодный период года характеризуется нагревом воздуха от температуры 2–5 °С до 18–20 °С в зависимости от удаленности уклонного блока от воздухоподающих стволов или скважин. В теплый период года в зависимости от температуры атмосферного воздуха может происходить как его нагрев, так и охлаждение. Существенного увлажнения воздушного потока в главных воздухоподающих выработках не наблюдается. Встречаются локальные источники влагопоступления в виде прорывов пара по системам трещин, оказывающие влияние на микроклиматические условия главных воздухоподающих выработок (ограниченное время до момента их ликвидации горнотехническими средствами).

Влагосодержание воздуха на входе в уклонный блок в общем случае определяется начальным влагосодержанием атмосферного воздуха. В ходке уклонного блока так же, как и в главных воздухоподающих выработках, происходит монотонный, но более интенсивный нагрев воздуха, который сопровождается также и более существенными влагопоступлениями.

Во всех действующих уклонных блоках наблюдаются процессы, аналогичные по соотношению тепло- и влагопоступлений. Исключением в данном случае является уклонный блок 3Т-9, теплообмен в котором имеет принципиально иной характер – наблюдается охлаждение воздуха с конденсацией влаги. Это объясняется тем, что данный участок находится на начальной стадии отработки, когда температура пород ходка близка к естественной температуре на данной глубине, т.е. 5–7 °С.

В эксплуатационной галерее уклонного блока, в которой ведется добыча нефти, процессы тепло- и влагопоступлений существенно интенсифицируются и, как правило, достигают максимальных значений для шахты в целом. С точки зрения микроклиматических условий данный процесс дополнительно усиливается тем, что эксплуатационная галерея характеризуется минимальным расходом воздуха для соответствующего тракта. Таким образом, на минимальный расход воздуха приходится максимальный тепловой поток, что приводит к резкому росту температуры воздуха, а также происходит контакт с нефтесодержащей жидкостью, что способствует резкому увлажнению воздуха.

На рис. 4 ниже представлены графики изменения температуры и влагосодержания воздуха при его движении по эксплуатационным галереям уклонных блоков 345 «Север», 1Т-2 и 1Т-9 нефтяной шахты № 1. Для представленных уклонных блоков также указано, какое количество лет они находятся в эксплуатации.

Во всех случаях нагрев воздуха сопровождается его существенным увлажнением, прослеживается корреляция данных величин.

При движении исходящей струи воздуха из эксплуатационной галереи по уклону уклонного блока происходит ее смешение с менее нагретыми струями воздуха, поступающими из насосной камеры и через вентиляционные сооружения сбоек наклонной части уклона. По пути движения воздуха по уклону происходит, как правило, его охлаждение вследствие теплообмена с породой. Влагопоступления в уклоне выражены слабо. В отдельных случаях происходит дополнительный нагрев исходящей из уклона струи воздуха.

В главных вентиляционных выработках нефтяной шахты также происходит охлаждение воздуха вследствие утечек через вентиляционные сооружения и камеры служебного назначения. Происходит теплообмен с породным массивом. Вследствие данных процессов температура вентиляционной струи снижается по пути движения к вентиляционному стволу № 2.

Микроклиматические условия уклонных блоков существенно изменяются в процессе отработки запасов соответствующего участка шахтного поля. Изменение происходит от охлаждающего микроклимата в период

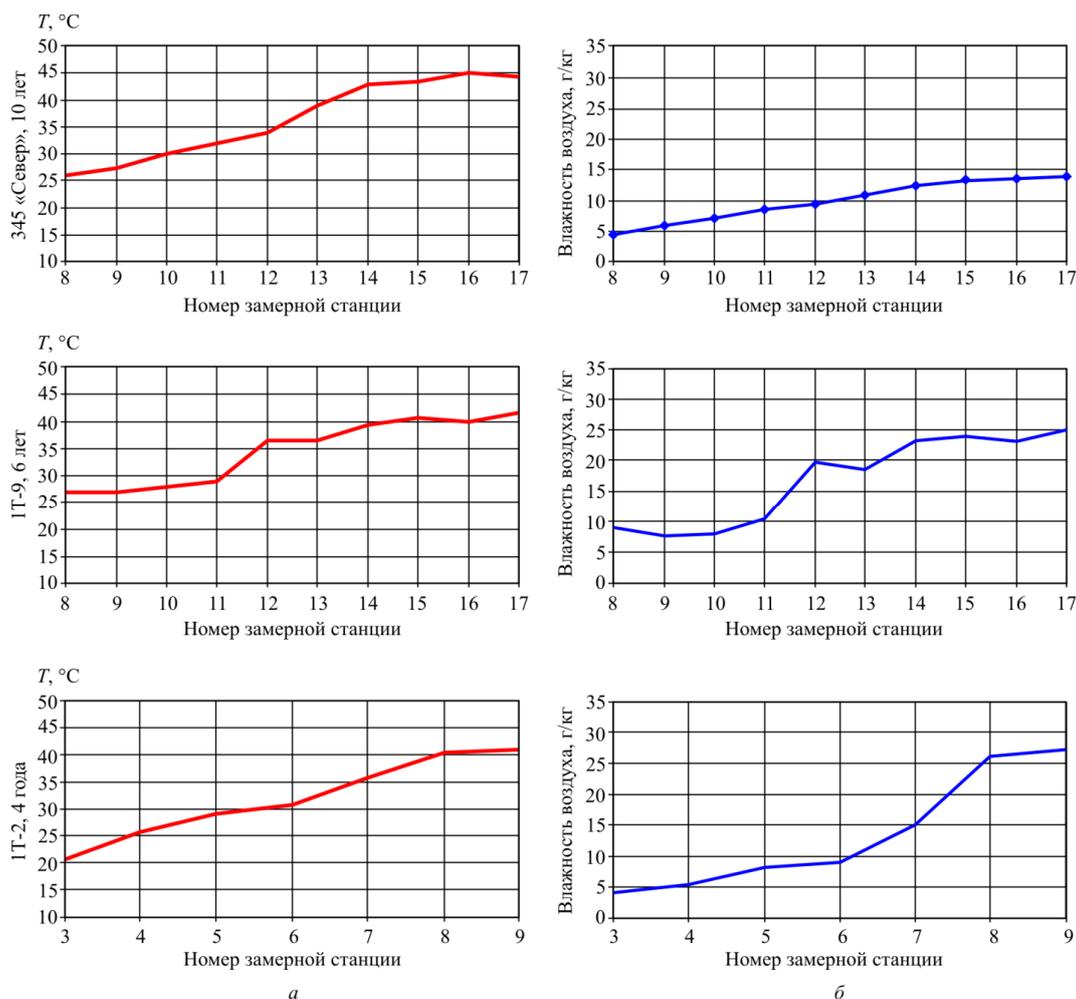


Рис. 4. Распределение температуры (а) и влажности воздуха, г/кг (б), по длине буровых галерей уклонных блоков нефтяной шахты

проходки горных выработок и ввода в эксплуатацию до нагревающего в период отработки и консервации уклонного блока. Данный период, как правило, занимает от 10 до 15 лет в зависимости от горно-геологических условий обрабатываемого участка и принятых параметров системы разработки.

Натурные наблюдения применяемых горнотехнических мероприятий

Различные мероприятия, позволяющие снизить влияние тяжелого теплового режима в выработках нефтяных шахт, испытываются с внедрения термошахтного способа добычи. Наиболее эффективные из них применяются в настоящее время.

В условиях нефтяных шахт нашли применение системы орошения («туманообразователи»), использующие воду из центральной системы водоснабжения с выдачей

воды через шахтный водоотлив (незамкнутая схема). Вода в данную систему поступает из водоема с температурой порядка 5–7 °С и разбрызгивается через форсунки в шахтную атмосферу. Данные системы применяются, как правило, непосредственно в бургалереях уклонных блоков. В процессе теплообмена воздуха с охлажденной водой происходит его увлажнение и охлаждение.

Применяемые в нефтяных шахтах системы орошения представляют собой систему из двух трубопроводов, расположенных на расстоянии 5–7 м друг от друга с распыляющим насадком на конце (см. термоснимок на рис. 5).

Эффективность работы существующей системы орошения можно охарактеризовать снижением температуры воздуха с начальными параметрами 40 °С при относительной влажности 30 % в количестве 10 м³/с до 37,8 °С с относительной влажностью 38 %.



Рис. 5. Термоснимок системы орошения, установленной в эксплуатационной галерее

Мероприятие направлено на дополнительную защиту горнорабочих от разбрызгивания нагретой нефтесодержащей жидкости при продувке добывающих скважин. Кроме того, данные укрытия снижают интенсивность перемешивания воздуха по объему эксплуатационной галереи.

Мероприятие направлено на устранение капежа разогретой нефтесодержащей жидкости с кровли выработки. Кроме того, данные укрытия снижают интенсивность теплообмена воздуха с поверхностью выработки и массивом в районе кровли.

В эксплуатационной галерее затяжка горной крепи, помимо ограждающей, несет также и теплоизоляционную функцию. Своевременный контроль состояния и ремонт затяжки снижают интенсивность теплообмена воздуха с разогретым массивом горных пород.

Исследование факторов, формирующих тепловой режим в нефтяных шахтах

Существующие факторы формирования микроклиматических параметров в горных выработках нефтяных шахт могут быть классифицированы на три группы в зависимости от направленности их теплового воздействия:

- 1) нагрев воздуха,
- 2) снижение температуры воздуха,
- 3) переменного действия.

Далее представлен анализ факторов для каждой из трех представленных групп.

Факторы нагрева воздуха

Нагрев шахтного воздуха происходит по одной из следующих причин: передача теплоты пара, закачиваемого в пласт; гидростатическое сжатие воздуха; передача теплоты от работы горно-шахтного оборудования; выделение

теплоты от вязкостного нагрева воздушного потока, вызванное внутренним трением.

Нагрев воздуха за счет теплоты пара, закачиваемого в пласт. Перенос теплоты от нагретого пара, закачиваемого в пласт по скважинам с поверхности, осуществляется посредством разных механизмов:

- Диффузионной теплопроводности в нефтяном пласте и граничащих слоях породного массива.

- Конвективного теплопереноса в массиве вместе с фильтрующимся в пласте нефтесодержащим флюидом.

- Теплопередачи через стенку выработки.

- Теплопередачи от нефти, транспортируемой по системе горных выработок от нефтесодержащих скважин на поверхность.

- Массообменной теплопередачи вследствие истечения пара по крупным трещинам пласта в шахтную атмосферу.

Классификацию факторов нагрева шахтного воздуха целесообразно провести в зависимости от местонахождения источника и конечного механизма теплоотдачи:

1. Теплообмен на границе раздела фаз «массив – воздух»:

- Теплоотдача от нагретых поверхностей горных выработок уклонных блоков (нефтяной пласт).

- Теплоотдача от нагретых поверхностей горных выработок основных воздухоподающих и вентиляционных трактов (туффитовый горизонт).

2. Теплопередача через поверхность раздела фаз «жидкость – воздух»:

- Теплопередача от нефтесодержащей жидкости к воздуху через металлическую стенку трубопровода.

- Тепловыделения от транспортируемой нефтесодержащей жидкости в эксплуатационной галерее.

- Тепловыделения от нефтепроявлений из стенок выработок.

3. Теплообмен за счет конвективного массообмена при поступлении пара в шахтную атмосферу и его смешивания с воздухом:

- Поступление пара в шахтную атмосферу при добыче нефти в эксплуатационной галерее.

- Поступление пара в шахтную атмосферу при транспортировке нефтесодержащей жидкости открытым способом.

- Поступление пара в шахтную атмосферу по системе трещин в массиве.

4. Прочие источники тепlopоступлений.

- Теплота от работы горно-шахтного оборудования.
- Вязкостный нагрев воздуха.

Физический механизм факторов, обуславливающих теплообмен на границе «массив – воздух», может быть описан следующим образом. Породный массив имеет свойство поглощать или выделять теплоту в пространство горных выработок, заполненное воздухом в зависимости от соотношения температур породного массива, стенок горных выработок и воздуха. На вентиляционных выработках нефтяных шахт НШУ «Яреганефть», по которым движется отработанная струя воздуха с температурой выше +30 °С, происходит теплообменный процесс поглощения теплоты породным массивом. *Теплообмен шахтного воздуха с породным массивом* тем более интенсивен, чем выше средняя скорость воздуха в выработке и чем больше площадь контакта воздуха с породным массивом или крепью. Данный теплообмен имеет конвективную природу и определяется параметрами турбулентности потока в тонком температурном пограничном слое вблизи стенок горных выработок (см. рис. 6) [3, 18–21].

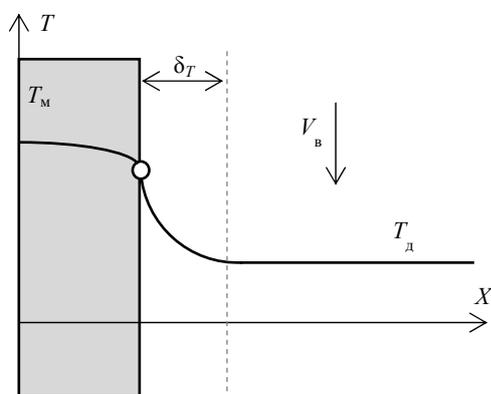


Рис. 6. Изменение температуры воздуха в пограничном слое

На границе с горной выработкой воздух имеет температуру, равную температуре массива (или крепи) T_m . В температурном пограничном слое малой толщины δ_T происходит конвективное вихревое перемешивание потока. В данном слое температура воздуха меняется от температуры стенки горной выработки до температуры T_b в ядре потока. Интенсивность теплообмена шахтного воздуха с породным массивом определяется интенсивностью вихревого турбулентного движения воздуха в

пограничном слое и описывается эмпирическим линейным законом Ньютона – Рихмана [19, 22]

$$q = \alpha(T_b - T_m),$$

где α – коэффициент теплообмена, интегрально учитывающий интенсивность вихревого перемешивания потоков воздуха в пограничном слое, Вт/(м²·°С).

Определяющими параметрами *теплопередачи между нефтесодержащей жидкостью и воздухом через стенку трубопровода* являются термическое сопротивление теплоизоляции стенки трубопровода, термическое сопротивление пограничных слоев флюидов на границах «металлическая стенка – нефть» и «металлическая стенка – воздух».

Закон теплоотдачи на границе «металлическая стенка – нефть» характеризуется следующим числом Нуссельта для конвективного течения флюида в трубах [23–25]:

$$Nu = 0,021 Re_n^{0,8} Pr_n^{0,43} \left(\frac{Pr_n}{Pr_{ct}} \right)^{0,25} \epsilon_l,$$

где Re_n – число Рейнольдса для потока нефтесодержащей жидкости; Pr_n – турбулентное число Прандтля для нефтесодержащей жидкости в ядре потока; Pr_{ct} – турбулентное число Прандтля для нефтесодержащей жидкости у стенки трубопровода, $\epsilon_l \approx 1$ – коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине.

Теплоотдача на границе «металлическая стенка – воздух» характеризуется следующим числом Нуссельта [26]:

$$Nu = 0,018 Re_b^{0,8},$$

где Re_b – число Рейнольдса для потока воздуха.

Тепловыделения от транспортируемой нефтесодержащей жидкости в эксплуатационной галерее. Первичная транспортировка нефтесодержащей жидкости от добычных скважин до зумпфа уклонного блока производится открытым способом по канавке, а иногда и по всей почве эксплуатационной галереи или выработок ходка и уклона. Перемещение нефтесодержащей жидкости происходит самотеком за счет проектного уклона выработок эксплуатационной галереи. В процессе течения нефтесодержащей жидкости по эксплуатационной галерее наблюдается нагрев воздуха посредством

вынужденной конвекции и испарения водяного пара, содержащегося в добываемой нефти. Величина тепловыделений определяется начальной температурой и расходом текущей жидкости, площадью поверхности теплообмена, скоростью и схемой движения жидких сред, временем теплообмена.

Тепловыделения от нефтепроявлений из стенок выработок. Горные выработки эксплуатационных галерей нефтешахты пройдены по нефтяному пласту. Вследствие этого гравитационное стекание разогретой нефти происходит не только в добычные скважины, но и непосредственно к стенкам горных выработок эксплуатационной галереи. Вследствие этого на стенках горных выработок образуется жидкостная пленка, интенсифицирующая теплообмен. Механизм теплообмена в данном случае может быть описан в рамках теории теплообмена в жидкостных пленках [41].

Конвективный массообмен шахтного воздуха и пара. Перемешивание шахтного воздуха и пара, поступающего в шахтную атмосферу через поры и трещины в массиве или из нефтедобычных скважин, происходит по закону равных массовых долей, а температура $T_{см}$ паровоздушного потока, образованного в результате смешения двух потоков с разными температурами T_b и T_n , определяется по формуле [27]

$$T_{см} = \frac{G_b T_b + G_n T_n}{G_b + G_n}, \quad (1)$$

где G_b и G_n – массовые расходы воздуха и пара соответственно, кг/с.

Выделение теплоты от работы горно-шахтного оборудования. Горно-шахтное оборудование с дизельными и электрическими приводами выделяет тепловую энергию в шахтную атмосферу. Для инженерных расчетов тепловыделений технологическое оборудование можно рассматривать как абсолютные источники теплоты. Мощность тепловыделения W по известной полезной мощности машины N и коэффициенту полезного действия η можно определить следующим образом [22, 28]:

$$W = \frac{1-\eta}{\eta} N.$$

Прирост температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в зависимости от тепловыделения при известной

плотности, теплоемкости и расходе воздуха определяется следующей формулой [22, 29]:

$$\Delta T = \frac{W}{\rho c Q}, \quad (2)$$

где ρ – плотность обдувающего машину воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; c – теплоемкость обдувающего машину воздуха, $\text{кДж}/\text{кг}$; Q – расход воздуха в выработке с горной машиной, $\text{м}^3/\text{с}$.

Вязкостный нагрев воздушного потока. Приращение теплоты воздушного потока вследствие вязкостного нагрева рассчитывается как работа в единицу времени, затрачиваемая на преодоление аэродинамического сопротивления и перемещение воздуха [30–31]:

$$W_{вн} = H Q,$$

где H – падение давления в рассматриваемой системе горных выработок (в данном случае во всей шахтной вентиляционной сети), вызванное трением воздуха при преодолении аэродинамического сопротивления, Па ; Q – суммарный расход воздуха в рассматриваемой системе горных выработок, $\text{м}^3/\text{с}$.

Прирост температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в зависимости от приращения теплоты $W_{вн}$ при известной теплоемкости и расходе воздуха определяется формулой, аналогичной (2).

Факторы снижения температуры воздуха

Отработанный шахтный воздух, исходящий из уклонных блоков нефтяных шахт, имеет температуру выше 30°C . На пути от уклонных блоков до вентиляционного ствола воздух охлаждается за счет действия следующих факторов:

1. Утечки через вентиляционные сооружения.
2. Теплообмен исходящей струи с породным массивом.

Вследствие утечек воздуха и последующего смешения с воздушными потоками, исходящими с уклонных блоков, происходит снижение температуры исходящей струи воздуха по пути движения к вентиляционному стволу шахты.

Перемешивание холодной и нагретой воздушных струй происходит по закону равных массовых долей, а температура $T_{см}$ воздушного потока, образованного в результате смешения двух потоков с разными температурами T_1 и T_2 , определяется по формуле, аналогичной (1):

$$T_{\text{см}} = \frac{G_1 T_1 + G_2 T_2}{G_1 + G_2},$$

где G_1 и G_2 – массовые расходы двух потоков воздуха, кг/с.

Физический механизм факторов, обуславливающих теплообмен исходящего воздуха с породным массивом, описан выше.

Разнонаправленные факторы и факторы переменного действия

Для условий нефтяной шахты № 1 НШУ «Яреганефть» можно выделить следующие тепловые факторы переменного действия:

1. Сезонные колебания параметров атмосферного воздуха.

2. Гидростатическое охлаждение и нагрев воздуха.

Сезонные колебания начальных параметров поступающего в шахту воздуха обуславливают различный характер и темп изменений температуры и влажности вентиляционной струи в сети горных выработок в разные периоды года [32, 33]. В холодный период года воздух поступает в воздухоподающие стволы при температуре, близкой к своему нижнему предельно допустимому «Правилами безопасности...» порогу + 2°C. Подогрев атмосферного воздуха осуществляется с помощью систем воздухоподготовки. При движении холодного воздуха по воздухоподающему стволу, выработкам околоствольного двора и главным воздухоподающим трактам происходит его нагрев за счет теплообмена с породами, имеющими более высокую температуру вследствие естественного геотермального распределения температуры массива, техногенного прогрева пласта и теплоты, аккумулированной приконтурной частью породного массива в теплый период года.

В теплый период года температура воздуха, поступающего по воздухоподающим стволам, может достигать 35 °С (абсолютно максимальная температура воздуха для г. Ухты [34]). В данный период наблюдается обратная тенденция – охлаждение воздуха на участках воздухоподающего ствола, околоствольного двора и главных воздухоподающих трактов вследствие более низкой температуры пород (с учетом техногенного воздействия на пласт), стойкого длительного охлаждения приконтурной части породного массива в холодный период года.

В рабочих зонах на уклонных блоках, расположенных на расстоянии более 1 км от

околоствольного двора, температура шахтного воздуха, как правило, уже достигает своего установившегося среднегодового значения за счет теплообмена с породным массивом на всем тракте движения воздушной струи от поверхности до рабочей зоны [22, 35–37]. Таким образом данный фактор не оказывает существенного влияния на микроклиматические параметры рабочих зон уклонных блоков.

При расчете теплообменных процессов в вертикальных и наклонных горных выработках необходимо учитывать наличие *гидростатического нагрева/охлаждения воздуха* при движении в поле силы тяжести и влияния данного процесса на формирование температурного поля и геотермического градиента естественного температурного поля горных пород. В условиях нефтяных шахт глубиной порядка 200 м влияние данного фактора приводит к изменению температуры воздуха в пределах 2 °С [38–39].

Зависимость прироста температуры воздуха за счет гидростатического сжатия от глубины шахтного ствола L определяется из следующей формулы [40]:

$$\Delta T = \frac{gL}{c + R/M},$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; c – удельная массовая теплоемкость воздуха при постоянном объеме, Дж/кг/К; R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль/К; M – молярная масса воздуха, кг/моль.

Помимо охлаждения нагретой воздушной струи, исходящей из уклонного блока, теплообмен оказывает сезонное переменное влияние на температуру воздуха, поступающего в шахту. В заданном неизменном режиме воздухораспределения на входе в удаленные уклонные блоки успевает установиться квазистационарный тепловой баланс, когда температура воздуха в выработках практически равняется температуре стенок породного массива.

Общая классификация описанных выше факторов, приводящих к изменению микроклиматических параметров в нефтяных шахтах, представлена на рис. 7 в виде схемы.

В результате проведенных натурных исследований определены параметры теплообменных процессов и диапазон значений физических величин, характерные для условий нефтяных шахт. Выделены наиболее значимые процессы, требующие учета в процессе разработки математической модели теплообмена:



Рис. 7. Классификация факторов формирования микроклимата в нефтяной шахте

- теплообмен с твердой нагретой поверхностью (массив, крепь, обвязка скважин, трубопроводы);
- теплообмен с поверхностью нагретой нефтесодержащей жидкости;
- поступление пара в рудничную атмосферу (из нефтесодержащей жидкости, посредством прорывов через скважины и трещины);
- фильтрация нефти и пара в массиве;
- нестационарность прогрева массива.

Диапазон входных параметров для разработки математической модели представлен в таблице.

Диапазон параметров буровой галереи для различных уклонных блоков нефтяной шахты № 1

Параметр	Значение	
	минимальное	максимальное
Сечение выработок, м ²	7	12,8
Толщина затяжки, м	0,05	0,05
Теплопроводность затяжки, Вт/м/°С	0,15	0,4
Давление прорывающегося пара, бар	1	1,2
Температура прорывающегося пара, °С	100	120
Температура нефтесодержащей жидкости, °С	6	110
Диаметр трубопроводов обвязки скважин, м	0,05	0,25
Длина эксплуатационной галереи, м	100	1000
Длина добывающих скважин, м	100	800
Расстояние до паронагнетательных скважин, м	50	800

Заключение

В работе представлены результаты экспериментального исследования закономерностей формирования теплового режима горных выработок нефтяных шахт на примере нефтяной шахты № 1 НШУ «Яреганефть» ООО «ЛУКОЙЛ-Коми». Исследования проводились Горным институтом УрО РАН при участии авторов статьи с 2011 по 2018 г. Основными результатами проведенного экспериментального исследования являются:

- представленная в графическом виде классификация факторов изменения микроклиматических параметров воздуха в нефтяной шахте (см. рис. 7),
- значения микроклиматических параметров рудничного воздуха и мощностей тепловыделений в различных горных выработках (см. рис. 3–5, таблицу).

Полученная классификация и измененные параметры воздуха являются основой для разработки математических моделей нестационарных тепломассообменных процессов, протекающих в нефтяных шахтах.

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

Библиографический список

1. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция. – М.: Углетехиздат, 1951. – 632 с.
2. Аэрология горных предприятий / К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков, Л.А. Пучков, И.И. Медведев. – М.: Недра, 1987. – 422 с.
3. McPherson M.J. Subsurface ventilation and Environmental engineering. – Chapman & Hall, 2009. – 824 p.
4. Зайцев А.В. Теплотехнические системы нормализации микроклиматических параметров воздуха в глубоких рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»» / А.В. Зайцев, Л.Ю. Левин, Б.П. Казаков, Ю.А. Клюкин // Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 34–40.
5. Гончаров С.А., Дмитриев А.П. Термодинамические процессы в горных породах. – М.: Недра, 1990. – 360 с.
6. Дядькин Ю.Д., Шувалов Ю.В., Тимофеевский Ю.С. Горная теплофизика. Регулирование теплового режима шахт и рудников. – Л.: ЛГИ, 1976. – 159 с.
7. Щербань А.Н., Кремнев О.А., Журавленко В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 359 с.
8. Wyndham C., Allan A., Bredell G., Andrew R. Assessing the heat stress and establishing the limits for work in a hot mine // Occupational and Environmental Medicine. – 1967. – Vol. 24. – P. 255–271. DOI: 10.1136/oem.24.4.255
9. Howes M.J., Nixon C.A. Development of procedures for safe working in hot conditions // Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1997.
10. Коноплев Ю.П. Научно-методические основы проектирования и анализа термошахтной разработки нефтяных месторождений: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2004. – 253 с.
11. 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.
12. Технологические принципы разработки залежей аномально вязких нефтей и битумов / Л.М. Рузин, И.Ф. Чупров, О.А. Морозюк, С.М. Дуркин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. – 480 с.
13. Создание безопасных условий труда в нефтяных шахтах при тепловом воздействии на пласт / Н.Д. Цхадая, А.Е. Жуйков, З.Х. Ягубов, Э.З. Ягубов // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 9. – С. 121–123.
14. Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А. Оценка эффективности системы распределенной подачи охлажденного воздуха как способа управления микроклиматическими параметрами шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 12. – С. 185–189.
15. Зайцев А.В., Семин М.А., Клюкин Ю.А. Исследование критериев нормирования микроклиматических условий в горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 12. – С. 151–156.
16. Каратаев А.Ф. Классификация способов, схем и систем вентиляции шахт // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1954. – Т. 79. – С. 17–28.
17. Разработка программно-вычислительного комплекса «АэроСеть» для расчета вентиляционных сетей шахт и рудников / Б.П. Казаков, Ю.В. Круглов, А.Г. Исаевич, Л.Ю. Левин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – № S3. – С. 21–33.
18. Weyburne D. A mathematical description of the fluid boundary layer // Applied Mathematics and Computation. – 2006. – Vol. 175. – P. 1675–1684.
19. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
20. Hall A.E. Computer techniques for calculating temperature increases in stopes and mine airways // Journal Mine Vent. Soc. of S. Africa. – 1975. – Vol. 28, № 4. – P. 55–59.
21. Lambrechts J. Prediction of wet bulb temperature gradients in mine airways // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 1968. – Vol. 68, iss. 8. – P. 372–373.
22. Зайцев А.В. Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2013. – 168 с.
23. Дрейцер Г.А. Нестационарный конвективный теплообмен при турбулентном течении газов и жидкостей в каналах // Теплоэнергетика. – 1998. – № 12. – С. 29–38.
24. Arkle K. Use of thermal insulation materials in mines // Jnl. Mine Ventilation Soc. of S. Africa. – 1985. – Vol. 38, № 4. – P. 43–45.
25. Baker-Duly C. Design of a large flexible underground refrigeration installation // 4th Int. Mine Ventilation Congress. – Brisbane, 1988. – P. 443–449.
26. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // ФТПРПИ. – 2014. – № 2. – С. 154–161.
27. Voss J. Control of the mine climate in deep coal mines // Proc. 1st Int. Mine Ventilation Congress. – Johannesburg, 1975. – P. 331.
28. Расчет количества воздуха по содержанию кислорода для проветривания рабочих зон при применении машин с двигателями внутреннего сгорания / Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев, Е.Л. Гришин, М.А. Семин // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 8. – С. 43–46.
29. Воропаев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. – М., 1966. – 252 с.
30. Семин М.А. Обоснование параметров систем вентиляции рудников в реверсивных режимах проветривания: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2016. – 151 с.
31. Hooman K., Ejlali A. Effects of viscous heating, fluid property variation, velocity slip, and temperature jump on convection through parallel plate and circular microchannels // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 37, № 1. – P. 34–38. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.09.011

32. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт: в 2 т. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – Т. 1. – 430 с.

33. Левин Л.Ю. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки шахт и рудников: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь: 2010. – 274 с.

34. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. 2012. 97 с.

35. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2012. – 329 с.

36. Gibson K.L. The computer simulation of climatic conditions in mines // 15th APCOM Symp. – Brisbane, 1977. – P. 349–354.

37. McAdams W.H. Heat transmission. – 3rd. ed. – New York: McGraw-Hill, 1954. – 478 p.

38. Kertikov V. Influence of relative variations along mine workings on air-flow temperature // Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress. Poland: Research & Development Center for Electrical Engineering and Automation, 2001. – P. 85–90.

39. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A. Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Vol. 86. – P. 288–293. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.004

40. Mine ventilation and air conditioning / H. Hartman [et al.]. – New York: John Wiley, 1997. – 752 p.

41. New asymptotic heat transfer model in thin liquid films / M. Chhay, D. Dutykh, M. Gisclon, C. Ruyer-Quil // Applied Mathematical Modelling. – 2017. – Vol. 48. – P. 844–859.

References

1. Skochinskiy A.A., Komarov V.B. Rudnichnaya ventilyatsiya [Mine ventilation]. Moscow, Ugletekhizdat, 1951, 632 p.

2. Ushakov K.Z., Burchakov A.S., Puchkov L.A., Medvedev I.I. Aerologiya gornyx predpriyatij [Aerology of mining enterprises]. Moscow, Nedra, 1987, 422 p.

3. McPherson M.J. Subsurface ventilation and environmental engineering. Chapman & Hall, 2009, 824 p.

4. Zaytsev A.V., Levin L.Yu., Kazakov B.P., Klyukin Yu.A. Teplotekhnicheskie sistemy normalizatsii mikroklimaticheskikh parametrov vozdukh v glubokikh rudnikakh ZF PAO “GMK “Norilskiy nikel”” [Thermal systems for the normalization of microclimatic air parameters in the deep mines of the Polar Division of PJSC Norilsk Nickel GMK]. *Mining Journal*, 2018, no.6, pp.34-40.

5. Goncharov S.A., Dmitriev A.P. Termodinamicheskie protsessy v gornyx porodakh [Thermodynamic processes in rocks]. Moscow, Nedra, 1990, 360 p.

6. Dyadkin Yu.D., Shuvalov Yu.V., Timofeevskiy Yu.S. Gornaya teplofizika. regulirovanie teplovogo rezhima shakht i rudnikov [Mine thermal physics. Regulation of thermal conditions of mines and pits]. Leningrad, Leningradskiy gosudarstvennyy institut, 1976, 159 p.

7. Shcherban A.N., Kremnev O.A., Zhuravlenko V.Ya. Rukovodstvo po regulirovaniyu teplovogo rezhima shakht [Mine thermal regime management guide]. Moscow, Nedra, 1977, 359 p.

8. Wyndham C., Allan A., Bredell G., Andrew R. Assessing the heat stress and establishing the limits for work in a hot mine. *Occupational and Environmental Medicine*, 1967, vol.24, pp.255-271. DOI: 10.1136/oem.24.4.255

9. Howes M.J., Nixon C.A. Development of procedures for safe working in hot conditions. *Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, 1997.

10. Konoplev Yu.P. Nauchno-metodicheskie osnovy proektirovaniya i analiza termoshakhtnoy razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy [Scientific and methodological foundations of the design and analysis of thermo-mine development of oil fields]. Doctor’s degree dissertation. Moscow, 2004, 253 p.

11. Levin L.Yu., Kormshchikov D.S. Osobennosti dobychi vysokovyazkoy nefi na primere Yaregskogo

mestorozhdeniya [Features of high-viscosity oil production on the example of the Yaregskoye field]. *Nauchnye issledovaniya i innovatsii*, 2010, vol.4, no.2, pp.33-36.

12. Ruzin L.M., Chuprov I.F., Morozyuk O.A., Durkin S.M. Tekhnologicheskie printsipy razrabotki zalezhey anomalno vyazkikh nefey i bitumov [Technological principles for development of deposits of abnormally viscous oils and bitumens]. Moscow, Izhevsk, Institut kompyuternykh issledovaniy, 2015, 480 p.

13. Tskhadaya N.D., Zhuykov A.E., Yagubov Z.Kh., Yagubov E.Z. Sozdanie bezopasnykh usloviy truda v neftyanykh shakhtakh pri teplovom vozdeystvii na plast [Creating a safe working conditions at thermal stimulation of formation]. *Oil industry*, 2013, no.9, pp.121-123.

14. Levin L.Yu., Semin M.A., Klyukin Yu.A. Otsenka effektivnosti sistemy raspredelennoy podachi okhlazhdennogo vozdukh kak sposoba upravleniya mikroklimaticheskimi parametrami shakht [Estimation of suballo-cated conditioned air distribution system efficiency as a method of mine microclimatic parameters control]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2013, no.12, pp.185-189.

15. Zaytsev A.V., Semin M.A., klyukin Yu.A. Issledovanie kriteriev normirovaniya mikroklimaticheskikh usloviy v gornyx vyrabotkakh [Improvement of microclimate conditions rationing criteria in mine airways]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*, 2015, no.12, pp.151-156.

16. Karataev A.F. Klassifikatsiya sposobov, skhem i sistem ventilyatsii shakht [Classification of methods, circuits and ventilation systems of mines]. *Izvestiya tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 1954, vol.79, pp.17-28.

17. Kazakov B.P., Kruglov Yu.V., Isaevich A.G., Levin L.Yu. Razrabotka programmno-vychislitel'nogo kompleksa “AeroSet” dlya rascheta ventilyatsionnykh setey shakht i rudnikov [Development of AeroSet software and computing complex for calculating the ventilation networks of mines and pits]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*, 2006, no.S3, pp.21-33.

18. Weyburne D. A mathematical description of the fluid boundary layer. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, vol.175, pp.1675-1684.

19. Shlikhting G. Teoriya pogrannichnogo sloya [Boundary layer theory]. Moscow, Nauka, 1974, 712 p.
20. Hall A.E. Computer techniques for calculating temperature increases in stopes and mine airways. *Journal Mine Vent. Soc. of S. Africa*, 1975, vol.28, no.4, pp.55-59.
21. Lambrechts J. Prediction of wet bulb temperature gradients in mine airways. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 1968, vol.68, iss.8, pp.372-373.
22. Zaytsev A.V. Razrabotka sposobov normalizatsii mikroklimaticeskikh usloviy v gornykh vyrabotkakh glubokikh rudnikov [Development of methods for the normalization of microclimatic conditions in deep mines]. Ph. D. thesis. Perm, 2013, 168 p.
23. Dreytser G.A. Nestatsionarnyy konvektivnyy teploobmen pri turbulentnom techenii gazov i zhidkostey v kanalakh [Unsteady convective heat transfer in turbulent flow of gases and liquids in channels]. *Teploenergetika*, 1998, no.12, pp.29-38.
24. Arkle K. Use of thermal insulation materials in mines. *Journal Mine Vent. Soc. of S. Africa*, 1985, vol.38, no.4, pp.43-45.
25. Baker-Duly C. Design of a large flexible underground refrigeration installation. *4th Int. Mine Ventilation Congress*. Brisbane, 1988, pp.443-449.
26. Levin L.Yu., Semin M.A., Zaytsev A.V. Razrabotka matematicheskikh metodov prognozirovaniya mikroklimaticeskikh usloviy v seti gornykh vyrabotok proizvodnoy topologii [Development of mathematical methods for predicting microclimatic conditions in the network of mine workings of arbitrary topology]. *FTPPI*, 2014, no.2, pp.154-161.
27. Voss J. Control of the mine climate in deep coal mines. *Proc. 1st Int. Mine Ventilation Congress*. Johannesburg, 1975, p.331.
28. Levin L.Yu., Zaytsev A.V., Grishin E.L., Semin M.A. Raschet kolichestva vozdukhа po sodержaniyu kisloroda dlya provetrivaniya rabochikh zon pri primenenii mashin s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya [The calculation of the amount of air on the oxygen content for ventilation of working areas when using machines with internal combustion engines]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2015, no.8, pp.43-46.
29. Voropaev A.F. Teoriya teploobmena rudnichnogo vozdukhа i gornykh porod v glubokikh shakhtakh [Theory of heat exchange of mine air and rocks in deep mines]. Moscow, 1966, 252 p.
30. Semin M.A. Obosnovanie parametrov sistem ventilyatsii rudnikov v reversivnykh rezhimakh provetrivaniya [Substantiation of the parameters of the ventilation systems of mines in the reverse modes of ventilation]. Ph. D. thesis. Perm, 2016, 151 p.
31. Hooman K., Ejlali A. Effects of viscous heating, fluid property variation, velocity slip, and temperature jump on convection through parallel plate and circular microchannels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, vol.37, no.1, pp.34-38. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.09.011
32. Shcherban A.N., Kremnev O.A. Nauchnye osnovy raschyeta i regulirovaniya teplovogo rezhima glubokikh shakht [Scientific basis for the calculation and regulation of the thermal regime in deep mines]. Kiev, Izdatelstvo AN USSR, 1959, vol.1, 430 p.
33. Levin L.Yu. Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy resursosberegayushchikh sistem vozdukhopodgotovki shakht i rudnikov [Theoretical and technological bases of resource-saving air preparation systems for shafts and mines]. Doctor's degree dissertation. Пермь, 2010, 274 p.
34. SP 131.13330.2012 Stroitel'naya klimatologiya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 23-01-99 [Construction climatology. Updated version of SNIp 23-01-99], 2012, 97 p.
35. Shalimov A.V. Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya, profilaktiki i borby s avariynymi narusheniyami provetrivaniya rudnikov [Theoretical bases of forecasting, prevention and control of emergency violations of the ventilation of mines]. Doctor's degree dissertation. Perm, 2012, 329 p.
36. Gibson, K.L. The computer simulation of climatic conditions in mines. *15th APCOM Symp*. Brisbane, 1977, pp.349-354.
37. McAdams W.H. Heat transmission. 3rd. ed. New York, McGraw-Hill, 1954, 478 p.
38. Kertikov V. Influence of relative variations along mine workings on air-flow temperature. *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress. Poland: Research & Development Center for Electrical Engineering and Automation*, 2001, pp.85-90.
39. Kazakov B. P., Shalimov A. V., Semin M. A. Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol.86, pp.288-293. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.004
40. Hartman H. et al. Mine ventilation and air conditioning. New York, John Wiley, 1997, 752 p.
41. Chhay M., Dutykh D., Gisclon M., Ruyer-Quil C. New asymptotic heat transfer model in thin liquid films. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, vol.48, pp.844-859.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Клюкин Ю.А., Семин М.А., Зайцев А.В. Экспериментальное исследование микроклиматических условий и факторов их формирования в нефтяной шахте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т.18, №1. – С.63–75. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.3.6

Please cite this article in English as:

Klyukin Yu.A., Semin M.A., Zaitsev A.V. The experimental study of microclimatic conditions and factors of their formation in the oil mine. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol.18, no.1, pp.63-75. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.3.6