

На правах рукописи

ШИПИКА Елена Сергеевна



**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
СИСТЕМЫ ПОДОГРЕВА НАРУЖНОГО ВОЗДУХА ДЛЯ
УГОЛЬНЫХ ШАХТ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

*Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение
горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная
теплофизика*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор

Гендлер Семен Григорьевич

Официальные оппоненты:

Кобылкин Сергей Сергеевич

доктор технических наук, доцент, НИТУ «МИСиС, профессор
кафедры безопасности и экологии горного производства

Зайцев Артем Вячеславович

кандидат технических наук, доцент, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, заведующий сектором математического моделирования и информационных технологий отдела аэрологии и теплофизики

Ведущая организация – ФГБОУВО «Тулский государственный университет»

Защита диссертации состоится 5 декабря 2019 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ212.224.06 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу – 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 4 октября 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



СИДОРОВ
Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Угольные производства России расположены, в районах с суровым климатом. В зимней период времени холодный период превышает 5 – 7 месяцев. В холодный период времени температура атмосферного воздуха опускается до – 15 °С – 20 °С. В таких условиях подогрев наружного воздуха, приводит к большим затратам энергии (тепловой или электрической), стоимость угля может достигать до 10%. Дополнительным резервом может служить горючий газ (метан), который дренируется из разрабатываемого угольного пласта.

Степень разработанности исследуемого направления:

Исследованиям систем подогрева и охлаждения воздуха на основе использования природных и вторичных источников теплоты были посвящены работы Дядькина Ю.Д., Шувалова Ю.В., Гендлера С.Г., Тимофеевского Л.С., Скрипникова В.Б., Левина Л.Ю., Кобылкина С.С., Зайцева А.В. и др. Эти работы посвящены разработке основных принципов создания систем применительно к условиям шахт и рудников в условиях вечной мерзлоты, глубоких рудников Севера, калийных шахт, горных выработок, не связанных с добычей полезных ископаемых.

Вопросы применения теплонаносных технологий для нужд теплоснабжения, в том числе для подогрева наружного воздуха, рассматривались Выборновым Д.В., Закировым Д.Г., Скрипниковым В.Б., Дзино А.А., Малининым О.С. и др. В результате исследований, выполненных этими учеными, была обоснована возможность применения тепловых насосов для регулирования теплового режима сооружений различного назначения.

Вместе с тем, вопросы использования тепловых насосов для повышения температурного потенциала шахтной воды с последующим ее использованием для подогрева наружного воздуха в калориферных установках, в том числе в сочетании с теплоносителем, полученным в газовых котлах за счет сжигания дренируемого из угольного пласта метана, изучены недостаточно.

Таким образом, обоснование целесообразности вовлечения извлекаемой с рабочих горизонтов шахтной воды в процесс

подогрева наружного воздуха перед подачей его в выработки, при необходимости, в совокупности с использованием теплоты сжигания метана, дренируемого из угольного пласта, дает возможность изменить структуру энергопотребления угольных шахт, что является **актуальной научно-технической задачей**.

Цель диссертационной работы. Оценка энергетической эффективности систем подогрева наружного воздуха угольных шахт на основе теплоты, получаемой от природных источников энергии, извлекаемых при добыче угля.

Идея диссертационной работы. При выборе параметров системы подогрева наружного воздуха на угольных шахтах следует учитывать потенциальные ресурсы теплоты шахтной воды (горных пород) и теплотворной способности метана при условии использования тепловых насосов и подземных аккумуляторов тепловой энергии.

Основные задачи исследований:

1. Анализ и обобщение литературных данных по системам регулирования теплового режима горнодобывающих предприятий, использующих природные и вторичные источники энергии.

2. Термодинамический анализ использования теплового потенциала шахтной воды в системах подогрева наружного воздуха, включающих тепловые насосы.

3. Экономический анализ эффективности использования тепловых насосов в системах подогрева наружного воздуха.

4. Определение области применения теплоты сжигания метана, дренируемого из разрабатываемых угольных пластов, в качестве дополнительного источника энергии в системах подогрева наружного воздуха.

5. Математическое моделирование процессов теплопереноса при аккумулировании тепловой энергии в пористых структурах естественного или искусственного происхождения.

Методы научных исследований основаны на использовании комплексного метода исследований, включающего термодинамический анализ систем подогрева рудничного воздуха, использующих теплонасосные технологии теплотворной способности дренируемого метана, аналитические методы анализа теплопереноса при подземном аккумулировании тепловой энергии, математическое моделирование процессов теплопереноса и сопоставление его результа-

тов с данными инженерных расчетов, экономические расчеты эффективности использования теплонасосных технологий для подогрева наружного воздуха в зимний период

Научная новизна:

1. Установление закономерностей формирования температурных полей в горном массиве при аккумуляции теплоты в периоды с низким энергопотреблением (температура наружного воздуха выше среднего значения, для которого осуществлен выбор параметров системы подогрева) и извлечением тепловой энергии во время дефицита тепловой энергии (температура наружного воздуха ниже среднего значения);

2. Определение рациональной области использования природных источников энергии для подогрева в зимний период времени наружного воздуха, подаваемого в горные выработки.

Защищаемые положения:

1. Ресурсный потенциал тепловой энергии шахтной воды для подогрева наружного воздуха определяется ее дебитом, начальной температурой пород на рабочем горизонте, температурой наружного воздуха и его количеством, необходимым для проветривания шахты, а также коэффициентом трансформации теплоты, характеризующим эффективность работы теплового насоса.

2. Дефицит ресурсов тепловой энергии шахтной воды может быть компенсирован повышением температурного потенциала теплоносителя, поступающего в калорифер, в результате нагрева до более высокой температуры части шахтной воды в газовом котле за счет сжигания метана, дренируемого из разрабатываемого пласта.

3. Повышение устойчивости системы подогрева наружного воздуха к возможным изменениям его температуры в течение зимнего периода при одновременном сокращении энергетических затрат может быть достигнута на основе подземных аккумуляторов тепловой энергии, используемых для промежуточного хранения теплоносителя, получаемого при отборе теплоты от шахтной воды и сжигания метана в периоды снижения энергопотребления.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в обосновании рациональных способов и схем использования шахтной воды и дренируемого метана для подогрева наружного воздуха.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректной постановкой задач исследования, применением классических методов термодинамики, математической физики и современных достижений вычислительной математики, сопоставимостью результатов аналитических и численных решений, соответствием приведенных результатов данным, полученным другими авторами, технико-экономическими расчетами, апробацией полученных результатов в периодической печати.

Апробация работы. Результаты исследований и основные положения диссертационной работы обсуждались и были одобрены научной общественностью на международных научно-практических конференциях: на ежегодной вузовской научной конференции «Полезные ископаемые России и проблемы их освоения» (СПб, Санкт-Петербургский горный университет, 2016); на Международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (СПб, Санкт-Петербургский горный университет, 2016); на ежегодной вузовской научной конференции «Полезные ископаемые России и проблемы их освоения» (СПб, Санкт-Петербургский горный университет, 2017); на Международной научной конференции «Технические и естественные науки» (СПб, «Гуманитарный национальный исследовательский институт», 2017); на Международной научно-практической конференции, посвященной 185-летию кафедры «Горное искусство», Горное дело в XXI веке: Технологии, Наука, Образование, (СПб, Санкт-Петербургский горный университет, 2017); на ежегодной вузовской научной конференции «Полезные ископаемые России и проблемы их освоения» (СПб, Санкт-Петербургский горный университет, 2018); на Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018», (СПб, Санкт-Петербургский горный университет, 2018); на IV Международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке», (СПб, Санкт-Петербургский горный университет, 2018); на XVI молодежной научно-практической конференции студенческого научного общества «Современные исследования в геологии» (СПб, Санкт-Петербургский государственный университет «Институт наук о Земле», 2018); на ежегодной вузовской научной конференции «Полезные ископаемые России и проблемы их освоения»

(СПб, Санкт-Петербургский горный университет, 2019); на Международном молодежном научном форуме «Ломоносов-2019» (Москва, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2019); на XV Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», (СПб, Санкт-Петербургский горный университет, 2019) на научно-технических советах Санкт-Петербургского горного университета (Санкт-Петербург, с 2015 – 2018 г.), а также на заседаниях кафедры безопасности производств.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследований; сборе и анализе данных ранее проводимых исследований; непосредственном участии в теоретических исследованиях; обобщении и сравнительном анализе полученных результатов; разработка практических рекомендаций.

Реализация результатов работы:

Разработанные способы и устройства для подогрева наружного воздуха планируются для внедрения на предприятиях АО «СУ-ЭК-Кузбасс».

Основные результаты исследований используются в учебном процессе кафедры безопасности производств Горного университета при изучении дисциплин: «Теплотехника», «Тепловой режим глубоких шахт и рудников; «Тепловые процессы в горных выработках и горных массивах».

Публикации: Основные результаты диссертационной работы содержатся в 32 печатных работах, в том числе 3 из них в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 – в издании, индексированном международной базой данных SCOPUS, получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 111 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 129 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, ставится цель и задачи исследований, сформулирована идея работы, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлена классификация природных источников энергии. Приведена классификация систем регулирования теплового режима шахт, рудников и подземных сооружений, использующие природные и вторичные источники энергии. Приведен анализ использования энергетического потенциала метана для подогрева шахтного воздуха.

Во второй главе приведен анализ использования калориферов для подогрева воздуха и методика определения их параметров. Представлены основные характеристики по выбору параметров тепловых насосов, используемых в системах теплоснабжения угольных шахт. Представлена характеристика газогенераторов для сжигания природного газа и газовых котлов для подогрева воды.

Третья глава включает термодинамический анализ энергетической эффективности использования теплоты шахтной воды для подогрева наружного воздуха. Разработана экономическая оценка эффективности тепловых насосов в системах подогрева воздуха при использовании в качестве низкопотенциальной энергии теплоты шахтной воды. Представлен термодинамический анализ энергетической эффективности использования теплоты шахтной воды и теплоты, получаемой при горении метана, дренируемого из разрабатываемого угольного пласта для подогрева наружного воздуха

Четвертая глава включает анализ типов подземных аккумуляторов тепловой энергии (ПАТЭ). Проведены исследования процессов теплопереноса при аккумулировании теплоты в водоносном пласте или искусственно созданной пористой среде. Осуществлено математическое моделирование процессов теплопереноса, для исследования динамики изменения коэффициента восстановления тепловой энергии, для конструкции подземного аккумулятора тепловой энергии.

В заключении приводятся основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Основные результаты исследований отражены в защищаемых положениях:

1. Ресурсный потенциал тепловой энергии шахтной воды для подогрева наружного воздуха определяется ее дебитом, начальной температурой пород на рабочем горизонте, температурой наружного воздуха и его количеством, необходимым для проветривания шахты, а также коэффициентом трансформации

теплоты, характеризующим эффективность работы теплового насоса.

Шахтная вода, удаляемая из шахты на поверхность, имеет начальную температуру, примерно, соответствующую температуре пород на рабочих горизонтах, которая зависит от глубины, на которой ведутся добычные работы. Например, на глубинах 200 – 300 м, где в настоящее время в Кузнецком угольном бассейне осуществляется добыча угля, температура пород равна 10 °С – 15 °С.

Производительность систем водоотлива, определяющая дебит шахтной воды, зависит от гидрогеологических условий, характеризующих каждую шахту. Для условий угольных АО «СУЭК-Кузбасс» производительность системы водоотлива составляет 268 – 1297 м³/час.

Количество воздуха, необходимое для проветривания шахт, зависит от метанноносности угольных пластов и производительности шахт, достигая значений 330 – 470 м³/с.

Расчетная тепловая мощность системы подогрева наружного воздуха $N_{h.w.}$ в зимнее время до температуры $t_{m.a.} = 2\text{ }^{\circ}\text{C} - 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре наружного воздуха, соответствующей минимальному значению в наиболее холодный период t_a , и его количестве Q_a , равна:

$$N_{h.w.} = \rho_a C_a Q_a \Delta t_a, \quad (1)$$

где $\rho_a C_a$ – плотность и удельная теплоемкость воздуха, кг/м³, кДж/(кг·°С); $\Delta t_a = (t_{m.a.} - t_a)$;

При заданных величинах дебита шахтной воды $W_{m.w.}$ и ее начальной температуре $Q_{m.w.in.}$, количество теплоты $N_{m.w.}$, которое может быть получено при условии ее охлаждения до температуры $\theta_{m.w.end.}$, составляет:

$$N_{m.w.} = \rho_{m.w.} W_{m.w.} C_{m.w.in.} \Delta \theta_{m.w.}, \quad (2)$$

где $\rho_{m.w.}$ – плотность воды при температуре $\theta_{m.w.in.}$ (°С), кг/м³; $C_{m.w.}$ – удельная теплоемкость шахтной воды, кДж/(кг·°С); $\Delta \theta_{m.w.}$ – величина охлаждения шахтной воды, °С; $\Delta \theta_{m.w.} = (\theta_{m.w.in.} - \theta_{m.w.end.})$, °С.

При дебитах шахтной воды, приведенных выше, ее охлаждение даже на 5 °С позволяет получить количество теплоты, эквива-

лентное 1,6 МВт – 7,5 МВт, что соответствует тепловой мощности 1,4 Гкал/час – 6,45 Гкал/час.

На глубинах перспективной добычи угля, где температура пород равна 20 °С – 30 °С, количество теплоты, аккумулированное в шахтной воде при снижении ее температуры до 5 °С, при тех же значениях дебитов будет эквивалентно соответственно 4,2 – 19,35 Гкал/час и 7 – 32,25 Гкал/час.

При использовании для подогрева наружного воздуха в калориферах до температуры 2 °С – 4 °С теплоносителя (воды) ее температура должна иметь температуру не менее 60 °С – 65 °С. Для получения теплоносителя (воды) с таким температурным потенциалом предлагается вместо традиционного метода, основанного на сжигании в котельных органического топлива, применение теплонасосной технологии.

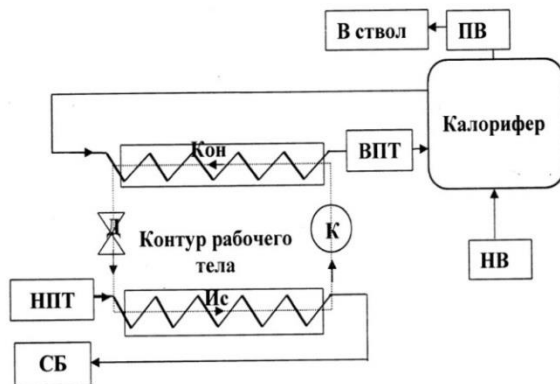


Рисунок 1 – Принципиальная схема использования теплового насоса для подогрева наружного воздуха (Ис – испаритель, Кон – конденсатор, К – компрессор, Д – дроссельный клапан, НПТ – низко потенциальный теплоноситель, ВПТ – высоко потенциальный теплоноситель, СБ – система сброса, НВ – наружный воздух, ПВ – подогретый воздух)

Принципиальная схема использования теплового насоса для получения теплоносителя выше указанного температурного потенциала предполагает подачу низкопотенциального теплоносителя (шахтной воды) в испаритель, компрессора, где осуществляется сжатие паров рабочего тела (аммиак, различного типа хладоны) и

конденсатора, в котором теплота, отдаваемая низкопотенциальным теплоносителем рабочему телу в испарителе N_{ev} , и мощность, подводимая к компрессору ($N_{h.p.}$), передаются теплоносителю (воде), поступающей в калорифер, а также дроссельный клапан для расширения рабочего тела (рисунок 1).

Эффективность работы теплового насоса определяется коэффициентом трансформации теплоты $K_{tr.r}$, который равен отношению теплоты N_{con} , полученной в конденсаторе, к затраченной мощности $N_{h.p.}$ (мощности, потребляемой тепловым насосом).

Теплота, передаваемая от рабочего тела воде, циркулирующей в конденсаторе N_{con} , может быть вычислена как,

$$N_{con} = W_{con} \varrho_{w.con} C_w \Delta \theta_{con}, \quad (3)$$

где W_{con} – расход воды, нагреваемой в конденсаторе, $\frac{m^3}{c} \left(\frac{m^3}{час} \right)$;

$\varrho_{w.con}$ – плотность воды в конденсаторе при средней температуре $\theta_{av.w.con}$ ($^{\circ}C$), $кг/м^3$; C_w – удельная теплоемкость воды, $кДж/(кг \cdot ^{\circ}C)$; $\Delta \theta_{con} = (\theta_{w.con.ex.} - \theta_{w.con.ent.})$; $\theta_{w.con.ent.}$, $\theta_{w.con.ex.}$ – температура воды на входе и выходе конденсатора, $^{\circ}C$.

В свою очередь, тепловая мощность калорифера, обеспечиваемая водой, поступающей из конденсатора теплового насоса, будет составлять:

$$N_{h.w.} = \rho_{w.h.a} C_{w.h.a} W_{con} \Delta \theta_{h.w.}, \quad (4)$$

$\rho_{w.h.a}$, $C_{w.h.a}$ – плотность и удельная теплоемкость воды при средней температуре в калорифере, $кг/м^3$, $кДж/(кг \cdot ^{\circ}C)$; $\Delta \theta_{h.w.} = (\theta_{w.con.ex.} - \theta_{w.h.a.ex.})$, $\theta_{w.h.a.ex.}$ – температура воды на выходе из калорифера, $^{\circ}C$.

Принимая, что теплота, отдаваемая рабочим телом воде в конденсаторе, может быть, ориентировочно, принята тепловой мощности калорифера $N_{h.w.}$, получим зависимость, определяющее соотношение между мощностями теплового насоса и калорифера:

$$\frac{N_{h.p.}}{N_{h.w.}} = 1 - \frac{\varrho_{w.con} W_{con} C_w \Delta \theta_{con}}{1} q_a \cdot C_a \cdot Q_a \cdot \Delta t_a \quad (5)$$

Выбор параметров теплового насоса осуществлен на основе зависимости (6). При расходах подогреваемого воздуха и шахтной воды, изменяющихся соответственно в интервалах $50 \text{ м}^3/\text{с} - 500 \text{ м}^3/\text{с}$ и $100 \text{ м}^3/\text{ч} - 600 \text{ м}^3/\text{ч}$, соотношение между мощностями теплового

насоса и калорифера, обеспечивающего подогрев наружного воздуха от температуры окружающей среды до температуры, равной 4 °С, в зависимости от отношения расходов шахтной воды и наружного воздуха, представлено на рисунке 2.

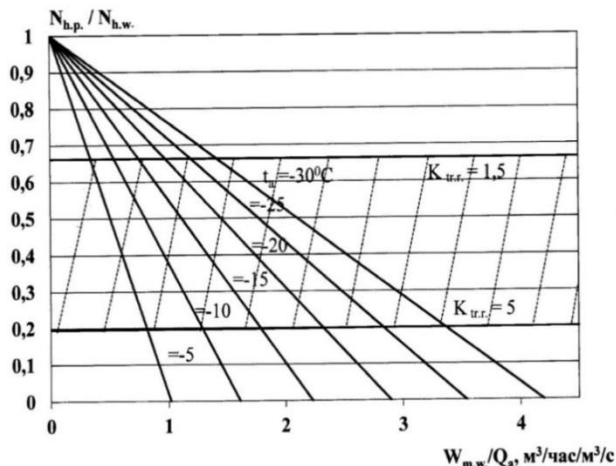


Рисунок 2 – Соотношение между мощностями теплового насоса и водяного калорифера от отношения дебита шахтной воды к расходу подогреваемого воздуха (начальная температура шахтной воды 15 °С, перепад температур воды в испарителе 10 °С)

Учитывая, что коэффициентом трансформации теплоты $K_{tr.r}$ является обратной величиной к отношению $N_{h.p.}/N_{h.w.}$, а его значение, как правило, находится в интервале 1,5 – 5, представляется возможным установить область рациональной работы теплового насоса в системе подогрева наружного воздуха шахты. На рисунке 2 она заключена между значениями $\frac{N_{h.p.}}{N_{h.w.}}$ – равными 0,2...0,67 (заштрихованная область).

Экономическая эффективность использования тепловых насосов в системах подогрева воздуха определена на основе расчетного анализа чистого дисконтированного дохода NPV. Зависимость для его вычисления имеет вид:

$$NPV = -(IC + R) + \sum_1^i \frac{(ATP+DE)}{(1+r)^i} \quad (6)$$

IC – стоимость тепловых насосов (инвестиции); R – стоимость монтажа, принимаемая равной $0,1R$; ATP – чистая прибыль, тыс. руб. в год; DE – величина годовых амортизационных отчислений, тыс. руб.; γ – норма дисконтирования (обычно принимаемая $0,10 - 0,25$); i – период амортизации тепловых насосов и вспомогательного оборудования (труб, насосов для перекачки воды, оборудования для очистки воды и т.п.) ($i = 10$ лет).

$$ATP = (1 - TIN) \cdot (EX_{tr.m.} - EX_{h.p.}), \quad (7)$$

где TIN – ставка налога на прибыль, доли ед.; $EX_{tr.m.}$ – затраты на подогрев воздуха с помощью традиционных технологий, предполагающих использование теплоносителя, получаемого на основе сжигания традиционных видов топлива, тыс. руб.; $EX_{h.p.}$ – годовые затраты на подогрев воздуха с помощью теплонасосной технологии, тыс. руб.

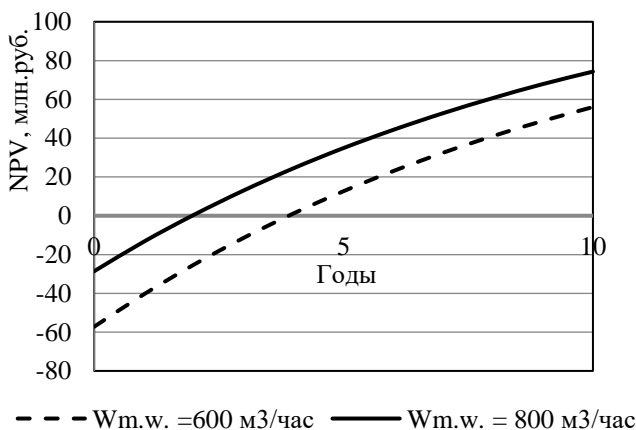


Рисунок 3 – Динамика NPV в течение десятилетнего периода

Результаты расчета NPV для условий, характеризующих Кемеровскую область: температура наружного воздуха – 17°C , что соответствует средней январской температуре воздуха; расход воздуха, необходимого для проветривания шахты $400 \text{ м}^3/\text{с}$; дебит шахтной воды с температурой 13°C равен $600 \text{ м}^3/\text{час}$, представлены на рисунке 3, из которого следует, что срок окупаемости системы подогрева наружного воздуха, использующей теплоту шахтной во-

ды и тепловой насос, зависит от дебита шахтной воды и составляет от 4 до 7,8 лет.

2. Дефицит ресурсов тепловой энергии шахтной воды может быть компенсирован повышением температурного потенциала теплоносителя, поступающего в калорифер, в результате нагрева до более высокой температуры части шахтной воды в газовом котле за счет сжигания метана, дренируемого из разрабатываемого пласта.

Выполненные оценки свидетельствуют о том, что использование теплоты шахтной воды для подогрева наружного воздуха в сочетании с тепловыми насосами экономически эффективно при дебитах шахтной воды, превышающих 300 – 500 м³/час.

При более низких значениях дебита шахтной воды для подогрева наружного воздуха необходимо использовать дополнительный источник энергии. В качестве такого источника в работе предложено использовать теплоту сжигания метана, дренируемого из угольных пластов при осуществлении дегазационных мероприятий.

Для установления потенциальной возможности использования энергетического потенциала метана для ряда угольных шахт АО «Суэк-Кузбасс» были вычислены общие дебиты метана и рассчитаны мощности, которые могут быть получены при его сжигании. Как показали выполненные оценки, значения этих мощностей варьируются в интервале 23 МВт (20,2 Гкал/час) – 88 МВт (76 Гкал/час).

Принципиальная схема реализации подогрева воздуха при сочетании использования теплоты шахтной воды и теплоты сгорания метана представлена на рисунке 4.

Для оценки эффективности работы теплового насоса в случае комбинированного использования теплоты и шахтной воды и теплоты сжигания метана использовано выражения (6), в правую часть которого добавлен член, учитывающий соотношение между теплотой от сжигания метана и теплотой, необходимой для подогрева воздуха $J_m \cdot q / q_a \cdot C_a \cdot Q_a \cdot \Delta t_a$, J_m – дебит метана, м³/с).

$$\frac{N_{h.p.}}{N_{h.w.}} = 1 - \frac{q_{w.con} W_{con} C_w \Delta \theta_{con}}{q_a \cdot C_a Q_a \Delta t_a} - \frac{j_m q}{q_a C_a Q_a \Delta t_a}, \quad (8)$$

где J_m – дебит метана, м³/с), а q - его теплотворная способность (39800 кДж/м³).

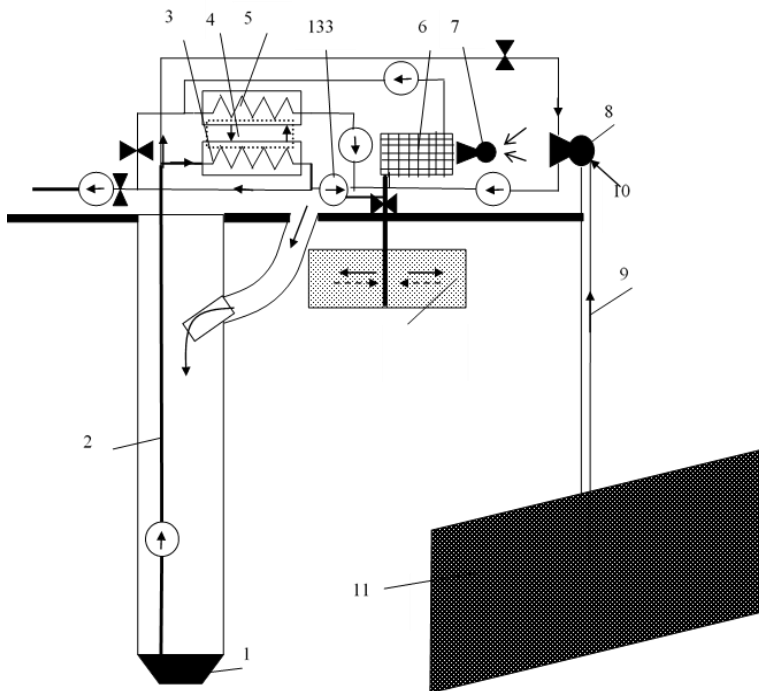


Рисунок 4 – Схема подогрева наружного воздуха за счет теплоты шахтной воды и теплоты сжигания метана: 1 – зумпф с шахтной водой; 2 – трубопровод для откачки шахтной воды; 3 – испаритель теплового насоса (ТН); 4 – конденсатор теплового насоса; 5 – хладагент теплового насоса; 6 – водяной калорифер; 7 – вентилятор; 8 – газовый котел; 9 – дренирующая скважина; 10 – метан; 11 – угольный пласт; 12 – подземный аккумулятор тепловой энергии (ПАТЭ)

Область рациональной работы теплового насоса при использовании в качестве дополнительного источника теплоты метана, подаваемого в газовый котел с дебитом J_m , показана на рисунке 5 (заштрихованная область).

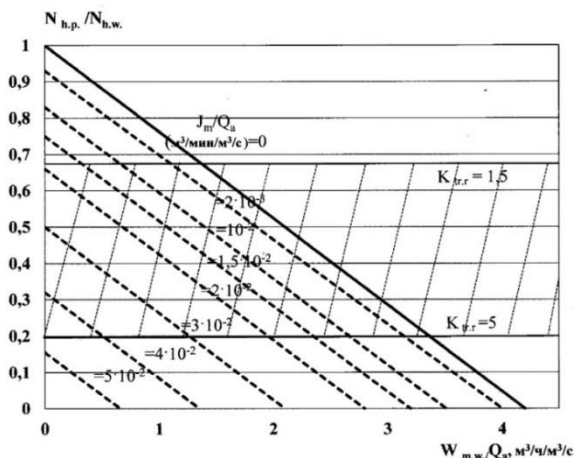


Рисунок 5 - Соотношение между мощностями теплового насоса и водяного калорифера от отношений дебитов шахтной воды ($W_{m.w.}$) и дренируемого метана (J_m) к расходу подогреваемого воздуха (Q_a) (при температуре наружного воздуха – 30 °С)

3. Повышение устойчивости системы подогрева наружного воздуха к возможным изменениям его температуры в течение зимнего периода при одновременном сокращении энергетических затрат может быть достигнуто на основе подземных аккумуляторов тепловой энергии, используемых для промежуточного хранения теплоносителя, получаемого при отборе теплоты от шахтной воды и сжигания метана в периоды снижения энергопотребления.

Температура наружного воздуха в течение зимнего периода изменяется по сложному вероятностному закону, опускаясь в одни временные интервалы до минимальных значений, а в другие временные интервалы, достигая максимальных величин.

Если тепловая мощность калорифера $N_{h.w.}$, вычисленная по средней за расчетный период температуре наружного воздуха, соответствует расход $W_{av.}$, то при снижении мощности на $\Delta N_{dec.}$, что соответствует повышению температуры воздуха, расход теплоносителя будет составлять $W_{dec.}$. Разница между расходами теплоносителя

W_{av} и W_{dec} может быть закачена в ПАТЭ для последующего хранения.

В течение периода закачки теплоносителя, его хранения в ПАТЭ и последующего извлечения часть тепловой энергии будет теряться безвозвратно в породных отдельностях, слагающих аккумулярующий объем, и на прогрев окружающего его массива горных пород. Если характеризовать отношение количеств теплоты, поступивших в проницаемую зону Q_{inj} и извлеченных из нее Q_{ext} после периода хранения, коэффициент восстановления тепловой энергии $k_{en.g.}$ ($k_{en.g.} = Q_{ext}/Q_{inj}$), то его величина будет зависеть от количества циклов закачки-извлечения, повышаясь с увеличением их числа, асимптотически приближаясь к единице.

В этой связи параметры ПАТЭ должны быть выбраны таким образом, чтобы величина коэффициента восстановления тепловой энергии была максимальна к 3 – 4 циклу закачки-извлечения.

Потери теплоты в процессе аккумуляирования приводят к тому, что ее количество, подаваемое в ПАТЭ, должно превосходить количество извлекаемой теплоты, т.е. $Q_{inj} = Q_{ext}./k_{en.g}$

На рисунке 6 показана схема подземного аккумулятора теплоты, использующего для последовательной закачки и извлечения теплоносителя одну скважину.

Тепломассоперенос в объеме пористой среды, используемой для аккумуляирования теплоты, рассматривается в рамках гомогенной модели, предполагающей «мгновенное» уравнивание» температур фильтрующегося теплоносителя и минерального скелета (породных отдельностей), слагающего проницаемую зону.

Численное решение задачи было осуществлено на основе программного пакета «Flow-Vision».

Для проведения математического моделирования область фильтрации была представлена на рисунке 7 в виде расчетных блоков (1000 расчётных блоков, размером 10x10x10 м).

Численные расчеты выполнялись для следующих исходных данных: начальная температура области фильтрации и вмещающих пород $T_0 = 5$ °C; $m = 0,3$; $\rho_K = 1900$ кг/м³; $C_{ск} = 2019$ Дж/(кг °C); $\lambda_{ск} = 0,814$ Вт/(м °C); $2h = 10$ м; $R_{скв} = 0,075$ м; $t_0 = 100$ °C; расход теплоносителя, закачиваемого в проницаемую зону и извлекаемого из нее, был принят равным 130 м³/ч.

Количество циклов закачки – хранения-извлечения теплоносителя равно 4. Время каждого из циклов закачки, хранения теплоносителя и его извлечения равны между собой и составляют 12 час. Общее время моделирования 144 час.

Результаты моделирования для третьего цикла закачки - извлечения представлены на рисунке 8-9.

По данным, характеризующим распределения температур в проницаемой зоне для каждого цикла закачки – извлечения, были вычислены количество теплоты, поступившие в проницаемую зону Q_{inj} извлеченные из нее Q_{ext} после периода хранения, а затем определена величина коэффициента восстановления тепловой энергии $K_{ен.г.}$.

Значения коэффициентов восстановления тепловой энергии для четырех циклов закачки теплоносителя и его извлечения с учетом периода хранения представлены на рисунке 10.

Анализ данных, представленных на рисунке 10, показывает, что к четвертому циклу закачки – извлечения коэффициент восстановления тепловой энергии становится равным 0,89.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение теплоты шахтной воды для подогрева наружного воздуха в сочетании с тепловыми насосами экономически эффективно при дебитах шахтной воды, превышающих 300 – 500 м³/час. При этом срок окупаемости системы подогрева наружного воздуха, использующей теплоту шахтной воды и тепловой насос, зависит от дебита шахтной воды и составляет от 4 до 7,8 лет.

2. При выборе типа ПАТЭ необходимо принимать во внимание, что основное количество теплоты должно быть аккумулировано не в породных отдельностях, слагающих аккумулирующий объем, а в воде, заполняющей свободное пространство (поры, пустоты и трещины). Это дает возможность в периоды извлечения тепловой энергии сократить при прокачке через ПАТЭ объем шахтной воды, необходимой для отбора части теплоты, аккумулированной в породах.

3. Для моделирования процессов теплопереноса в аккумулирующем объеме, представляющем собой часть водоносного пласта или созданным в результате заполнения специально образованного котлована сыпучим материалом (щебень, гравий, песок), целесооб-

разно использование гомогенной физической модели, предполагающей «мгновенное» уравнивание температур нагнетаемого теплоносителя и породных отдельностей.

4. Результаты математического моделирования доказывают, что для ПАТЭ, созданных в проницаемых зонах с значениями эффективной пористости, превосходящих 0,25 – 0,3, коэффициент восстановления тепловой энергии уже к четвертому циклу закачки – откачки теплоносителя асимптотически стремится к 0,9.

5. При определении количества теплоносителя, закачиваемого в аккумулирующий объем, учитываются потери теплоты, в период хранения теплоты и извлечения из ПАТЭ теплоты, определяемые коэффициентом восстановления энергии.

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гендлер, С. Г. Основные направления использования природных источников энергии для подогрева наружного воздуха в угольных шахтах / С.Г. Гендлер, **Е.С. Шипика** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 4. Спец. вып. 5-1. – С. 228-235 (Перечень ВАК РФ).

2. Гендлер, С. Г. Перспективы использования природных источников энергии для подогрева наружного воздуха на угольных шахтах / С.Г. Гендлер, **Е.С. Шипика** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017.– № 4. – С. 283-293 (Перечень ВАК РФ).

3. Гендлер, С. Г. Перспективы использования природных источников энергии для теплоснабжения угольных шахт / С.Г. Гендлер, М.М. Попов, **Е.С. Шипика** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) – 2019.– Т.1. – №4; Спец. вып. 6. – С. 58-65 (Перечень ВАК РФ).

4. Gendler, S. G. Energy saving technologies based on natural heat sources for heating outdoor air / S.G. Gendler, М.М. Попов, **Е.С. Шипика** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science – 2018. Vol.194. – P. 1–6 (**Scopus**).

5. Патент 171440 Российская Федерация, Установка для подогрева наружного воздуха / С.Г. Гендлер, С.В. Ковшов, **Е.С. Шипика**; заявл. 19.12.2016, опублик. 31.05.2017, Бюл. №16. Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

В прочих изданиях:

1. **Шипика, Е. С.** Использование природных энергоресурсов для подогрева воздуха на горнодобывающих предприятиях / С. Г. Гендлер, Е. С. Шипика // Научно-практический журнал «Аспирант» / Южный университет «Институт управления бизнеса и права», (ИУБиП), г. Ростов-на-Дону – Том №9 – 2016. – С. 68-71.

2. **Шипика, Е. С.** Параметры использования природных источников энергии для подогрева наружного воздуха в зимнее время на горнодобывающих предприятиях / С.Г. Гендлер, Е.С. Шипика // Тематический сборник докладов Международной конференции «Национальное развитие». – г. Санкт-Петербург – 2017. – С. 57-60.

3. **Shipika, E. S.** Employment of natural energy sources for outer air heating over winter time on coal mines // Current problems of environmental protection. Assesment of the state of environment. Threats of the environment. Applied technologies in environmental protection. University of Silesia, Katowice, Poland – 2017. – P. 94-95.

4. **Шипика, Е. С.** Перспективы использования природных источников энергии для подогрева воздуха в зимнее время на горнодобывающих предприятиях / С.Г. Гендлер, Е.С. Шипика // Международная научно-практическая конференция «Geonature-2018» при поддержке международных организаций / сборник научных трудов: отв. редактор И.И. Нестеров. – г. Тюмень: ТИУ –2018. – С. 103-107.

5. **Шипика, Е. С.** Перспективы использования энергосберегающей технологии при подогреве наружного воздуха на основе природных источников теплоты / С.Г. Гендлер, Е.С. Шипика // XVI Молодежная научно-практическая конференция студенческого научного общества «Современные исследования в геологии». г. Санкт-Петербург – 2018. – С.201-203.

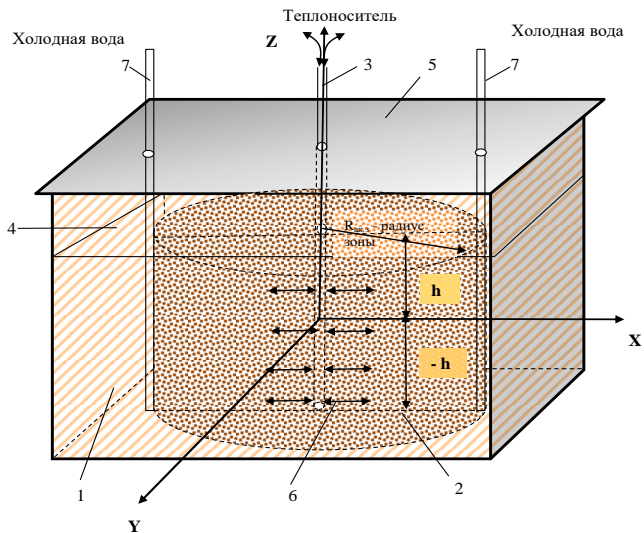


Рисунок 6 – Принципиальная схема подземного аккумулятора теплоты, использующего одну скважину для закачки и извлечения теплоносителя (1 – зона повышенной проницаемости; 2 – теплоаккумулирующий объем; 3 – скважина для закачки и извлечения теплоносителя; 4 – поверхность контакта зоны повышенной проницаемости (фильтрующего объема пород) и «непроницаемых» вмещающих пород; 5 – массив «непроницаемых» вмещающих пород; 6 – направления закачки и извлечения теплоносителя из зоны повышенной проницаемости; 7 – скважины для сброса части теплоносителя в случае искусственно образованного котлована

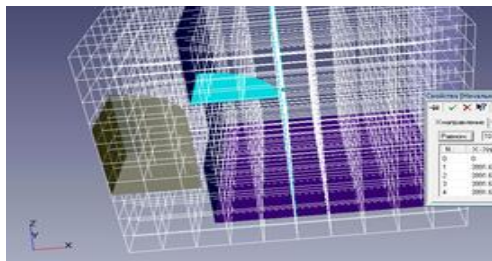


Рисунок 7 – Представление области фильтрации в виде расчетных блоков

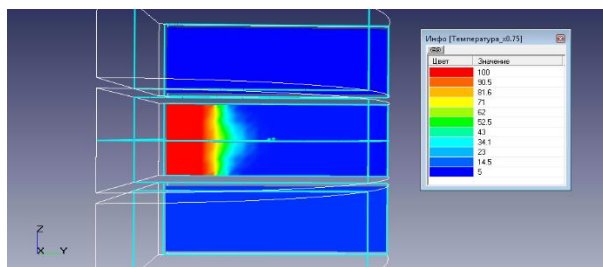


Рисунок 8 – Распределение температур по объему проницаемой зоны в конце третьего цикла закачки (84 час)

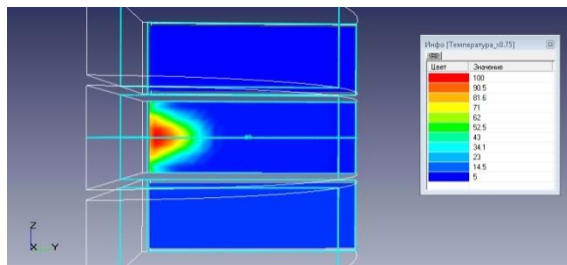


Рисунок 9 – Распределение температур по объему проницаемой зоны в конце третьего цикла извлечения теплоносителя после 12 часового периода хранения (108 час)

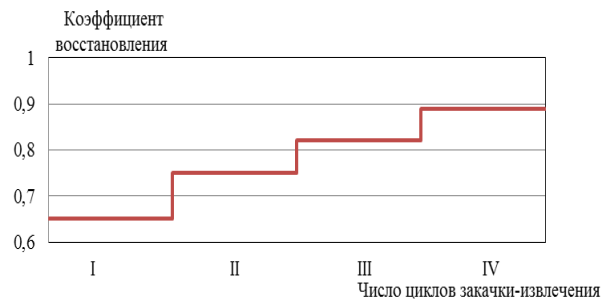


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента восстановления тепловой энергии от числа циклов закачки – хранения – извлечения