DOI: *10.18454/PMI.2017.2.209*

УДК 536:24:622.413

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ВЫРАБОТОК

А.Ф.ГАЛКИН
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Приводятся отдельные результаты комплексных исследований (экспериментальных и теоретических) по использованию теплообменных горных выработок, в том числе расположенных в мерзлых породах, в качестве подземных сооружений двойного назначения. Предлагается теплообменные выработки использовать как отдельный многофункциональный модуль, который в обычный период эксплуатации будет служить для создания нормативных параметров теплового режима в шахтах и рудниках, а в условиях чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера будет защитным сооружением для укрытия горнорабочих. В качестве теплообменных модулей могут быть использованы отработанные и специально пройденные горные выработки. Экономический анализ показал, что использование таких многофункциональных модулей не увеличивает эксплуатационные затраты горных предприятий, в то же время повышается безопасность ведения горных работ и надежность в условиях чрезвычайных ситуаций. Отмечается наличие большого количества теоретических и экспериментальных исследований в области комплексного использования горных выработок, что позволяет разработать на их основе нормативные документы для проектирования. Сделана оценка опыта практического использования теплообменных выработок для регулирования теплового режима шахт и рудников.

***Ключевые слова*:** теплообменная выработка, тепловой режим, регулирование, безопасность, проектирование, чрезвычайные ситуации, мерзлые породы

***Как цитировать эту статью*:** Галкин А.Ф. Комплексное использование теплообменных выработок // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 209-214. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.209

Введение. При проектировании современных шахт и рудников не учитывается необходимость и возможность комплексного использования выработок, хотя свод правил, разработанных МЧС России, это предусматривает [8]. В проектах шахт и рудников разделы инженерно-технических мероприятий по гражданской обороне и при чрезвычайных ситуациях, как правило, не только не предусматривают сохранение отработанных выработок (определенной части, пригодной для повторного использования) на случай чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера, но и комплексного использования горных выработок, задействованных в технологических процессах подземного сооружения. В то же время, в научных кругах давно утвердилось мнение о целесообразности и экономической эффективности вторичного использования горных выработок шахт и рудников, в том числе и в качестве теплообменных модулей. Особенно это актуально для подземных шахт и рудников Севера ввиду высокой стоимости в этих регионах электрической и тепловой энергии, а также большой длительности холодного периода, в который необходимо подогревать воздух до нормативных значений.

Постановка задачи. На основе анализа основных нормативных документов, опубликованных результатов теоретических и экспериментальных исследований обоснована целесообразность комплексного использования теплообменных выработок шахт, рудников и подземных сооружений Севера, рассмотрена возможность модульного использования теплообменных выработок, когда часть их в условиях чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера может быть использована в качестве защитного сооружения для работающих смен и населения. Оценена полнота и достаточность имеющегося научного задела для разработки нормативного документа федерального уровня при проектировании подземных сооружений модульного типа.

Анализ результатов исследований. Действующие в нашей стране строительные нормы и правила по проектированию и строительству подземных сооружений не распространяются на зону многолетней мерзлоты, которая занимает более 70 % территории РФ. В настоящее время существует всего лишь один нормативный документ ТСН-31-323-2002 «Подземные объекты в горных выработках криолитозоны Якутии» [9]. Документ включает раздел «Объемно-планировочные и конструктивные решения», который впервые предлагает проектировщикам новые технические решения по комплексному использованию горных выработок, в частности, по проектированию и строительству модульных подземных сооружений. Суть данного подхода к проектированию заключается в том, что часть выработок подземного сооружения имеет двой-

DO:I 10.18454/PMI.2017.2.209

ное назначение, а часть только технологическое, причем выработки двойного назначения в обычное время эксплуатируются в общей технологической схеме, а в случае возникновения чрезвычайных ситуаций имеют возможность автономной эксплуатации. При этом взаимовлияние выработок двойного назначения и обычных технологических выработок должно быть минимальным (минимизируется по критерию обеспечения качества нормативных параметров при технологии эксплуатации подземных сооружений по прямому назначению), т.е. не ухудшать общую технологию эксплуатации подземного сооружения по прямому назначению.

Основным требованием к выработкам двойного назначения с экономической точки зрения должно быть включение в общую технологическую схему функционирования подземного сооружения в обычное время. По нашему мнению, для условий Севера, где большинство технологических процессов отличается повышенной энергоемкостью, в том числе и процессы регулирования теплового режима, наиболее рациональным является использование в качестве выработок двойного назначения специальных теплообменных модулей [1]. Это позволяет включить выработки в общую схему вентиляции шахт, рудников и подземных сооружений в качестве средства для обеспечения нормативных параметров микроклимата. Такое техническое решение, как показывают результаты теоретических исследований и опыт эксплуатации подземных сооружений, позволяет снизить затраты энергии на кондиционирование за счет рационального использования тепла (холода) атмосферного воздуха, аккумулированного горными породами, окружающими выработки [3, 4].

Рассмотрим некоторые типовые схемы использования теплообменных модулей двойного назначения на примере подземного холодильника. Схемы подземных холодильников должны включать два основных модуля: холодоаккумулирующий (двойного назначения) и основной (для хранения продовольствия). Схема соединения модулей должна обеспечивать нормативные параметры микроклимата, как по требованиям защитных сооружений, так и по требованиям хранения продовольствия [1]. В период использования холодоаккумулирующего модуля по прямому назначению он должен обеспечивать запас холода, достаточный для поддержания нормативной температуры хранения продовольствия в основных модулях в течение всего периода хранения без применения холодильной техники, либо использование техники с незначительной мощностью. При использовании холодоаккумулирующего модуля в качестве защитного сооружения он изолируется от основных модулей и может быть быстро переоборудован для приема людей. Как показывает анализ, температура в основных модулях может быть сохранена на заданном уровне в течение всего срока использования холодильника как защитного сооружения. На рис.1, 2 показаны различные варианты принципиальных схем модульных холодильников двойного назначения для условий Севера. Стрелками показано движение воздуха. Как видно из рис.1, 2, в случае необходимости основной модуль может быть оперативно отделен от холодоаккумулирующего, который используется полностью или частично как защитное сооружение.

Следует отметить, что большинство требований к защитным сооружениям, размещаемых в горных выработках (СНиП 2.01.54-84) и объектам народного хозяйства в подземных горных выработках (СНиП 2.01.55-85), совпадают, что облегчает проектирование и строительство с использованием модульного принципа. В обычное время холодоаккумулирующий модуль может быть использован для дополнительного накопления холода в период проморозки. Кроме того, поскольку предусматривается независимая вентиляция модуля, то накопление холода может производиться и после загрузки основных модулей. Для интенсификации теплообмена и увеличения холодоаккумулирующих свойств массива через барьерные целики могут быть пробурены скважины большого диаметра (рис.2, б).

Для холодильников небольшой мощности барьерный целик может быть заменен воздухонепроницаемой продольной стенкой, разделяющей штольню на два отсека (рис.2, а), образующие геоаккумулятор. Данное техническое решение существенно повышает эффективность аккумулирования энергии в теплообменных выработках. При использовании холодильника как защитного сооружения целесообразно производить реверсию вентиляционной струи с одновременным подключением энергетического источника, что позволяет достичь нормативных параметров микроклимата более высокими темпами.

Результаты оценки эффективности использования холодоаккумулирующих модулей в подземных холодильниках для поддержания нормативных параметров теплового режима в рабочих камерах

DOI: 10.18454/PMI.2017.2.209

показали целесообразность проектирования подземных сооружений модульного типа. Подобные модульные системы могут быть использованы и при проектировании шахт и рудников. По существующей классификации они могут быть отнесены к обыкновенным горно-техническим системам [1, 4]. Для повышения энергетической эффективности подобных горно-технических систем регулирования теплового режима может быть предусмотрена их эксплуатация с особыми режимами вентиляции, в том числе обеспечивающими эффективное использование энергии исходящей вентиляционной струи [1, 2, 10].

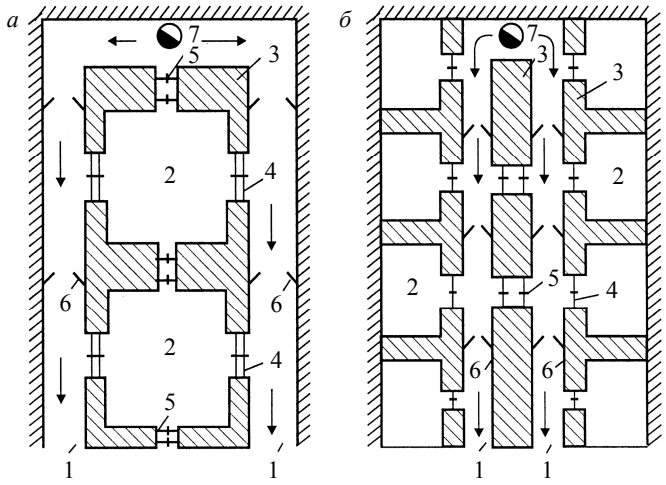


Рис.1. Модульные схемы подземных сооружений (первый вариант): *а* – фланговая; *б* – центральная

1 – холодоаккумулирующий модуль; 2 – основной модуль; 3 – барьерные целики; 4 – герметичные двери; 5 – герметичные тамбуры; 6 – вентиляционные двери; 7 – вентиляционный ствол (скважины)

Ранее были проведены комплексные теоретические исследования для основных классов горно-технических систем обыкновенных, рекуперативных, регенеративных и комбинированных (например, рекуперативных, работающих в регенеративном режиме), смешанных, включающих горные выработки и скважинные коллекторы. В основу расчета горно-технических систем, которые рассматривались как системы с распределенными параметрами, положена разработанная и реализованная численно математическая модель для прогноза температурного режима выработки и окружающего массива пород с учетом фазовых превращений влаги в породах. Модель учитывает: изменение свойств горных пород во времени и пространстве, переменное термическое сопротивление крепи по длине выработок, наличие абсолютных и относительных источников тепловыделений, неравномерно рассредоточенных по длине, сезонные и суточные колебания температуры наружного воздуха и другие определяющие параметры.

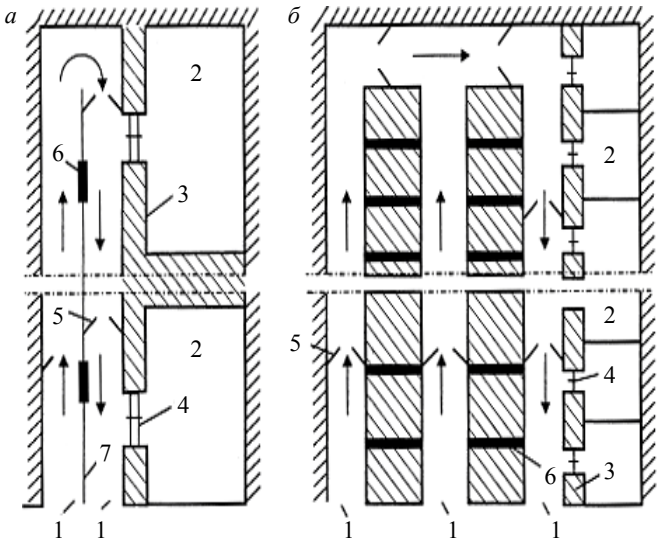


Рис. 2. Модульные схемы подземных сооружений (второй вариант)

1 – холодоаккумулирующий модуль; 2 – основной модуль; 3 – барьерные целики; 4 – герметичные двери; 5 – вентиляционные двери; 6 – вентиляционные окна (*а*), скважины (*б*); 7 – герметичная разделительная стенка

В результате теоретических исследований установлены основные закономерности протекания процессов теплообмена в горно-технических системах различного класса и обоснованы оптимальные значения определяющих характеристик, которые обеспечивают минимум энергетических и экономических затрат при эксплуатации. В частности, установлено, что с энергетических позиций наиболее целесообразным является последовательное соединение теплообменных выработок в единую сеть. Разработана методика сравнительной оценки экономической и энергетической эффективности использования различных вариантов горно-технических систем. Определена область рационального использования каждого класса систем в зависимости от геокриологических и климатических условий эксплуатации подземных сооружений. Установлено, что горно-технические системы регулирования можно успешно применять и вне зоны многолетней мерзлоты.

Экспериментально исследованы особенности формирования теплового режима в подземных сооружениях различного назначения, в том числе при эксплуатации в режимах полной или час-

DO:I 10.18454/PMI.2017.2.209

тичной изоляции [3, 5]. Разработана и реализована в виде самостоятельного программного продукта методика совместного решения задач воздухораспределения и теплового режима в сети горных выработок криолитозоны, в том числе в условиях изменяющегося объема горных выработок с течением времени [11, 12, 16].

Главной особенностью вентиляции подземных сооружений модульного типа является возможность как совместного, так и раздельного проветривания выработок основных технологических модулей и выработок модулей двойного назначения. Проведенные комплексные оценочные тепловые расчеты показали, что в случае возникновения чрезвычайных ситуаций представляется возможным обеспечить нормативные параметры микроклимата в защитных сооружениях, размещаемых в выработках двойного назначения, в необходимые сроки, не нарушая при этом тепловой и вентиляционный режим основных технологических модулей. Использование модульного принципа возможно и на действующих горно-добывающих предприятиях. В этом случае необходимо предусматривать по мере развития подземных горных работ сохранение определенного объема выработок, а при необходимости и их реконструкцию, с целью дальнейшего включения их в общую шахтную систему вентиляции в качестве теплообменных выработок двойного назначения.

Было сделано научное обоснование целесообразности включения выработок отработанных горизонтов горно-добывающих предприятий в системы вентиляции и кондиционирования рудничного воздуха. Разработаны новые способы регулирования теплового режима шахт и рудников Севера, учитывающие возможность комплексного использования горных выработок. Основное внимание при этом уделялось энергетической и экономической эффективности новых систем регулирования теплового режима, что важно для практического внедрения новых технических решений в практику проектирования. В частности, предложены схемы оптимальных режимов вентиляции теплообменных выработок с периодическим проветриванием. Найдены оптимальные с энергетических и экономических позиций расходы воздуха, которые целесообразно подавать через систему в течение годового цикла. Проведенные оценочные расчеты для характерных условий эксплуатации рудников Севера показали, что в этом случае годовая энергетическая эффективность горно-технических систем может быть увеличена не менее чем на 30 %.

Для повышения сезонной энергетической эффективности горно-технических систем предложены специальные теплоаккумулирующие покрытия, которые позволяют эффективно гасить суточные и декадные колебания наружного воздуха в переходные периоды года. Применение таких покрытий позволяет существенно повысить надежность систем и избежать прорывов холодного воздуха в выработки, исключив их обледенение[3, 4].

Использование теплообменных выработок в качестве защитных модулей должно предусматривать их надежное крепление, особенно для выработок, пройденных в дисперсных мерзлых породах, характерных для криолитозоны. Прочность подобных пород существенно зависит от температурного режима, и резко снижается при оттаивании пород. Эксплуатация защитных сооружений всегда предусматривается при положительной температуре внутреннего воздуха, что приведет к активному оттаиванию пород, окружающих защитный модуль. В связи с этим, для более эффективного использования выработок двойного назначения были разработаны и внедрены специальные негорючие многофункциональные несущие теплозащитные покрытия на основе цементного связующего. Покрытия могут наноситься на поверхность выработок как способом сухого, так и мокрого набрызг-бетонирования. В период использования выработок в защитных целях подобные покрытия, как показали экспериментальные исследования, проведенные на рудниках Норильска и Якутии, позволяют создать комфортные и безопасные условия обитания на весь период эксплуатации сооружения в условиях чрезвычайных ситуаций. Кроме того, такие покрытия не ухудшают характеристики теплообменных выработок при обычном режиме эксплуатации, так как предотвращают иссушение горных пород в пределах деятельного слоя выработок.

Иссушение горных пород в пределах деятельного слоя приводит к снижению коэффициента теплопроводности горных пород, что снижает энергетические характеристики теплообменных выработок. С течением времени, для получения одного и того же энергетического эффекта приходится увеличивать длину цепи теплообменных выработок. Применение теплозащитных покрытий снимает эту проблему. Расчеты показывают, что увеличение термического сопротивле-

DOI: *10.18454/PMI.2017.2.209*

ния крепи, которое обуславливает наличие теплозащитного покрытия на поверхности выработки, и, как следствие, снижение интенсивности теплообмена, с лихвой компенсируется сохранением теплофизических характеристик пород деятельного слоя выработок.

Для обеспечения устойчивости пород теплообменных выработок в период возможных шахтных пожаров, когда используется реверсия вентиляционной струи и температура воздуха может превышать значение на некоторых участках выработки 200 °С, разработаны специальные покрытия, изменяющие свое термическое сопротивление при повышении температуры. Разработаны покрытия двух видов. Первый вид основан на использовании вспучивающихся красок, которые изменяют свое термическое сопротивление в 5-7 раз. Послойное нанесение таких красок между слоями теплозащитной конструкции крепи позволяет обеспечить устойчивость мерзлых пород и избежать обвалов пород в выработках. Недостатком таких конструкций является их «одноразовость», т.е. после пожара крепь выработок нуждается в полной реконструкции. Второй тип покрытия свободен от этого недостатка, так как позволяет изменять термическое сопротивление в зависимости от действия теплового потока как в большую, так и меньшую сторону, но стоимость такого покрытия значительно выше. Выбор того или иного вида покрытия должен проводиться на основе технико-экономического анализа [1, 6, 7, 13].

Создана методическая база для оценки и выбора оптимальных режимов вентиляции, способов соединения в единую сеть, количества и геометрических параметров выработок двойного назначения, а также других характеристик, совокупность которых позволяет получить максимальный энергетический и экономический эффект от использования теплообменных модулей в подземных сооружениях. В частности, установлено, что наиболее целесообразным способом соединения теплообменных выработок в единую сеть является последовательное соединение. Наиболее эффективными в энергетическом плане являются рекуперативные системы с «разделительной стенкой», а не типа «труба в трубе», как считалось ранее. Для регенеративных систем регулирования теплового режима, при всех прочих равных параметрах, существует оптимальное значение расхода воздуха, которое целесообразно в них подавать. Разработаны экономико-математические модели, которые позволяют выбрать любые оптимальные параметры теплообменных модулей двойного назначения, в том числе параметры многофункциональных теплозащитных покрытий [1, 2, 10, 12, 14-16].

Выводы. Анализ существующих нормативных документов по строительству подземных сооружений показал, что они нуждаются в совершенствовании. Основным направлением является разработка нормативных документов по проектированию и строительству специальных теплообменных модулей двойного назначения для новых предприятий и включение в технологическую схему ведения горных работ части отработанных горных выработок для действующих шахт и рудников. Результаты многочисленных исследований доказывают правомерность, возможность и экономическую эффективность данного подхода в целом к решению проблемы строительства защитных сооружений в зоне многолетней мерзлоты на всей территории страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галкин А.Ф.* Тепловой режим подземных сооружений Севера: Новосибирск: Наука, 2000. 304 с.

2. *Галкин А.Ф.* Эффективный режим проветривания горных выработок криолитозоны // Горный журнал. 2009. № 4. С. 65-67.

3. *Галкин А.Ф.* Горнотехнические системы регулирования теплового режима // Горная промышленность. 2008. № 3. С. 14-17.

4. *Галкин А.Ф.* Теплоаккумулирующие выработки / А.Ф.Галкин, Ю.А.Хохолов. Новосибирск: Наука, 1992. 133 с.

5. *Кузьмин Г.П.* Подземные сооружения в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 2002. 176 с.

6. *Курилко А.С.* Применение набрызгбетонных теплозащитных покрытий в условиях криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 12. С. 147-152.

7. *Соловьев Д.Е.* Расчет неравномерной теплоизоляции при знакопеременном тепловом режиме в горной выработке криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 10. С. 263-267.

8. СП 11-107-98. Порядок разработки и состав раздела «Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны. Мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций» проектов строительства. М.: МЧС России,1998. 22 с.

9. ТСН-31-323-2002. Подземные объекты в горных выработках криолитозоны Якутии. Территориальные строительные нормы Республики Саха (Якутия). Якутск: Минстрой РС(Я), 2002. 24 с.

10. *Хохолов Ю.А.* Выбор оптимального расхода воздуха в теплоаккумулирующих выработках / Ю.А.Хохолов, П.Н.Васильев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. Отдельный выпуск. № 3. С. 128-136.

DO:I *10.18454/PMI.2017.2.209*

11. *Хохолов Ю.А.* Математическое моделирование процессов теплообмена в подземных выработках криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. Т. 12. № 1. С. 102-111.

12**.** *Хохолов Ю.А.* Совместное решение задач воздухораспределения и теплового режима в сети горных выработок криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 7. С. 70-73.

13. *Хохолов Ю.А.* Математическое моделирование процессов теплообмена в камерах ожидания глубоких рудников Севера / Ю.А.Хохолов, В.В.Киселев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 10. С. 353-358.

14. *Galkin A.F.* Efficiency evaluation of thermal insulation use in criolithic zone mine openings // Metallurgical and Mining Industry, 2015. № 10. P. 234-237.

15. *Shayhlislamova I.* The system of the air cooling of deep mines / I.Shayhlislamova, S.Alekseenko // Technical and Geoinformational Systems in Mining. Leiden:CRC Press, 2011. P. 105-109.

16. *Khokholov Yu.A.* Procedure of joint calculation of temperature and ventilation mode in uninterrupted mining in permafrost zone / Yu.A.Khokholov, D.E.Solov'ev // JMS. 2013. Vol. 1. P. 138-145.

Автор **А.Ф.Галкин,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *afgalkin@yandex.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петрбург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 12.10.2016.