

ных материалов, эксплуатируемых при низких температурах, чрезмерный износ не связан с асимметрией теплоотвода.

2. Во избежание аварийных ситуаций, при работе техники с узлами трения из полимерных подшипников в условиях низких температур, целесообразно предварительно подогревать узел трения путем запуска и работы в течение 5 мин в теплом помещении.

#### Литература

1. Протасов Б.В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 152 с.

2. Старостин Н.П. Граничные обратные задачи теплообмена систем для контроля и диагностики технического состояния узлов трения // Идентификация динамических систем и обратные задачи: докл. Международной конф. – М.; СПб., 1998. – С. 272–286.

3. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

4. Dropkin D., Karmi A. Natural – convection heat transfer from a horizontal cylinder rotating in air // Trans: ASME. – 1957. – V. 59, № 4. – P. 19–27.

5. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.

Поступила в редакцию 17.01.2012

УДК 622.413.4:551.34

## Закономерности формирования температурного режима подземного криохранилища в условиях вечной мерзлоты

А.С. Курилко, Ю.А. Хохолов, Е.К. Романова, В.В. Киселев

*Разработана методика прогноза температурного режима камеры хранения подземного криохранилища. Приведены результаты исследования закономерностей формирования температурного режима подземного криохранилища в зависимости от различных технологических и конструктивных параметров.*

Ключевые слова: вечная мерзлота, подземное криохранилище, температурный режим, математическая модель, холодильное оборудование, тепловые нагрузки.

*The technique of the underground cryostorage chamber temperature regime forecast is worked out. The results of the study of regularities of the underground cryostorage temperature regime formation depending on various technological and constructive parameters are presented.*

Key words: permafrost, underground cryostorage, temperature regime, mathematical model, refrigeration equipment, thermal loads.

В настоящее время во всем мире наблюдается повышенный интерес к использованию недр и имеющегося подземного выработанного пространства для размещения различных объектов складского назначения, в том числе в регионах криолитозоны, где функционируют два самых крупных подземных криохранилища мирового банка семян, получившего неофициальное название «Ноева ковчега для семян». Исследованиями,

проведенными ИМЗ и ИБПК СО РАН, подтверждена возможность использования подземных сооружений в качестве криохранилищ семенного фонда [1, 2].

Климатические условия Севера, наличие мощной толщи многолетнемерзлых пород и неограниченных запасов холода благоприятны для строительства подземных холодильников и криохранилищ, эксплуатируемых с отрицательным температурным режимом на территории Северо-Востока РФ, включая РС(Я). Среднегодовая температура наружного воздуха колеблется от -5,7 (южные регионы) до -16,5°C (северные). При этом суточные колебания температур весьма резкие и могут составлять более 15°C. Число морозных дней в году доходит до 300. Мощность толщи мерзлотных пород возрастает от

---

КУРИЛКО Александр Сардокович – д.т.н., зав. лаб. ИГДС СО РАН, a.s.kurilko@igds.ysn.ru; ХОХОЛОВ Юрий Аркадьевич – д.т.н., в.н.с. ИГДС СО РАН, khokholov@igds.ysn.ru; РОМАНОВА Елена Константиновна – к.т.н., м.н.с. ИГДС СО РАН, helconst@mail.ru; КИСЕЛЕВ Валерий Васильевич – к.т.н., с.н.с. ИГДС СО РАН, khokholov@igds.ysn.ru.

нескольких десятков метров у южных границ до 400–700 м на Севере. Сезонные температурные колебания затухают на глубине 15–30 м. Естественная температура мерзлых пород изменяется от -0,5 до -10°C.

Современный уровень проектирования, наличие высокопроизводительных технологий позволяют разрабатывать качественные проекты и вести строительство энергоэффективных подземных сооружений любых размеров и сложности, в том числе подземных криохранилищ семенного фонда, как для отдельных регионов, так и в целом РФ.

Наличие в северных регионах с развитой горнодобывающей промышленностью большого количества отработанных подземных горных выработок, пригодных для вторичного использования, позволяет размещать в них объекты складского назначения.

Одним из важнейших вопросов, определяющих энергоэффективность эксплуатации подземного криохранилища, является рациональное использование естественного холода, как атмосферного, так и аккумулированного горными породами, минимизирующее энергозатраты на выработку искусственного холода.

Время эксплуатации подземного криохранилища в плане регулирования температурного режима может быть разделено на три периода различной продолжительности [3]:

- предварительное охлаждение и промораживание вмещающих пород;
- постепенное уменьшение теплового потока из породного массива;
- квазистационарный температурный режим.

В свою очередь в зависимости от времени года эксплуатация подземного криохранилища может быть также условно разделена на два периода – зимний и летний, кардинально отличающиеся по условиям регулирования температурного режима.

В зимний период основной целью регулирования температурного режима в хранилище является максимальное накопление атмосферного холода породным массивом, в летний – минимизация его утечек и экономное расходование.

Процесс нагнетания воздуха зимой во вновь построенное подземное криохранилище в первый год эксплуатации носит название «проморозка», а при его ежегодном повторении – «хладозарядка», как это принято для подземных холодильников.

В подземном криохранилище возможно применение трех способов регулирования температурного режима:

– естественного – требуемая температура хранения биоматериалов ( $t \leq -18^\circ\text{C}$ ) в камерах в течение года поддерживается за счет запаса холода, создаваемого путем естественной проморозки, и ежегодной хладозарядки в зимний период наружным воздухом, поступающим в горные выработки под действием естественной тяги или нагнетания вентиляторами;

– искусственного – требуемая температура хранения биоматериалов поддерживается с помощью холодильных установок, работающих в круглогодичном режиме;

– комбинированного – сочетание использования естественного (атмосферного) холода зимой (хладозарядка) и использования холодильных машин летом для компенсации холодопотерь и поддержания требуемой температуры воздушной среды в камерах хранения.

В основу регулирования температурного режима подземного криохранилища должен быть положен принцип высокой энергетической эффективности для устойчивого поддержания требуемой температуры хранения семенного фонда в течение столетия при условии максимального использования естественного и минимального – искусственного холода.

Для прогноза температурного режима камеры хранения подземного криохранилища разработана трехмерная математическая модель теплообменных процессов в горных выработках с учетом фазовых переходов влаги в окружающих горных породах.

Процесс распространения тепла в массиве горных пород, вмещающих камеру, описывается с помощью нестационарного уравнения теплопроводности с учетом фазовых переходов влаги [4]:

$$\left[ C(T) + \sum_{\mu=1}^{\mu_0} L_{\phi} \cdot w \cdot \rho \cdot \delta_{\mu}(T - T^*) \right] \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (x, y, z) \in \Omega, \quad (1)$$

где  $C(T)$  – объемная теплоемкость пород, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности пород, Вт/(м·К);  $L_{\phi}$  – скрытая теплота фазовых переходов, Дж/кг;  $w$  – влажность пород, д.ед.;  $\rho$  – плотность пород, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура горных пород, °C;  $T^*$  – температура плавления (замерзания) воды, °C;  $\delta_{\mu}$  – функция Дирака;  $\mu$  – номер фронта фазового перехода;  $\Omega$  – расчетная область.

На границе области  $\Omega$ , состоящей из поверхностей, ограничивающих камеру,  $\Gamma_k$  задается граничное условие третьего рода:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n_{\Gamma_K}} = \alpha \cdot (T - T_{\text{воз}}), \quad (x, y, x) \in \Gamma_K, \quad (2)$$

где  $\partial / \partial n_{\Gamma_K}$  – внешняя по отношению к области  $\Omega$  нормаль к границе  $\Gamma_K$ ;  $T_{\text{воз}}$  – температура воздуха в камере, °C;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи через стенки камеры, Вт/(м<sup>2</sup>·K).

Коэффициент теплоотдачи в условиях вынужденной конвекции  $\alpha_{\text{вк}}$  определяется по формуле [5]:

$$\alpha_{\text{вк}} = 1,72 \cdot \frac{\varepsilon_K \cdot v_{\text{воз}}^{0,8} \cdot \rho_{\text{воз}}^{0,8} \cdot P_K^{0,2}}{S_K^{0,2}}, \quad (3)$$

где  $v_{\text{воз}}$  – скорость вентиляционного потока, м/с;  $\rho_{\text{воз}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $P_K$  – периметр камеры, м;  $S_K$  – площадь поперечного сечения камеры, м<sup>2</sup>.

Формула для расчета коэффициента свободного конвективного теплообмена имеет вид [6]:

$$\alpha_{\text{ск}} = 1,66 \cdot \sqrt[3]{T - T_{\text{воз}}}. \quad (4)$$

Условие теплообмена на дневной поверхности  $\Gamma_{\text{дн.пов.}}$ :

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{\text{дн.пов.}} \cdot (T - T_{\text{нар.воз}}), \quad (x, y, z) \in \Gamma_{\text{дн.пов.}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{нар.воз}}$  – температура наружного воздуха, °C;  $\alpha_{\text{дн.пов.}}$  – коэффициент конвективного теплообмена на грунтов дневной поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·K).

Коэффициент теплообмена на дневной поверхности рассчитывается с учетом скорости ветра и наличия снежного покрова.

На границах теплового влияния,  $\Gamma_{\text{т.в}}$  и на плоскости симметрии  $\Gamma_c$  принимается, что потоки тепла отсутствуют. В начальный момент времени задается распределение температуры горных пород.

Уравнение сохранения энергии в камере хранения учитывает теплообмен с окружающим массивом горных пород.

Математическая модель теплообмена в камере подземного криохранилища реализована численными методами конечных разностей. Применена локально-одномерная схема с использованием методики Самарского–Моисеенко [7].

Разработанная трехмерная математическая модель теплообмена в камере подземного криохранилища позволяет сделать долгосрочный прогноз температурного режима в зависимости от глубины заложения и геометрических размеров камеры, природно-климатических условий, теплофизических характеристик окружающих пород, режима вентиляции (начало, продолжи-

тельность, интенсивность проветривания), режима загрузки продуктом (время, объем загрузки, теплофизические характеристики продукта, нормативная температура хранения, вид укладки продукта), возможности использования холодильных установок. В результате ее численной реализации можно установить основные закономерности формирования температурного режима подземного криохранилища и обосновать его конструктивные параметры, обеспечивающие долговременное хранение семян.

В качестве примера приведем расчет тепловых нагрузок на холодильное оборудование, поддерживающее необходимый температурный режим (-8°C) при различных режимах зимней хладозарядки и глубинах заложения камеры хранения, произведенный с использованием разработанной методики.

Расчеты проведены для климатических условий г. Якутска. Размеры камеры хранения: ширина 6 м, высота 4 м, длина 50 м. Эксплуатационный год начинается осенью с наступлением отрицательной температуры атмосферного воздуха (конец сентября). Перед пуском в эксплуатацию проводится первичная проморозка камеры естественным (атмосферным) холодом путем принудительной вентиляции. Во время эксплуатации зимняя хладозарядка камеры не проводится, необходимая температура хранения (-8°C) поддерживается с помощью холодильных установок.

Мощность холодильных установок, необходимая для поддержания требуемой температуры воздуха в холодильной камере, рассчитывается по величине теплопритоков в камеру.

На рис. 1 представлена динамика изменений теплопритоков в камеру за первые 10 лет эксплуатации при разных режимах пуска в эксплуатацию: без предварительной проморозки и с проморозкой в течение нескольких лет. Нагнетание атмосферного воздуха проводится в те-

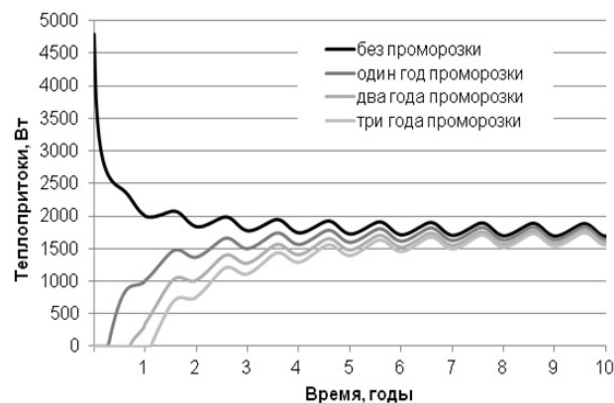


Рис.1. Теплопритоки в камеру при разных режимах пуска в эксплуатацию

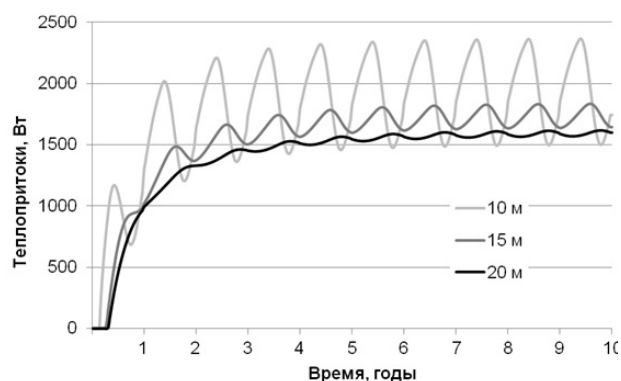


Рис. 2. Теплопритоки в подземную камеру при разных глубинах заложения от земной поверхности

ние четырех самых холодных месяцев (ноябрь–февраль) с интенсивностью  $15 \text{ м}^3/\text{с}$ . Как видно из рисунка, предварительная проморозка способствует активному промораживанию вмещающего породного массива, соответственно отодвигает срок включения холодильных установок и существенно сокращает тепловые нагрузки на них, что наиболее ярко выражено в первые годы эксплуатации. Годичная проморозка сокращает энергозатраты на выработку искусственного холода за первый год эксплуатации в 5 раз, двухгодичная – в 59 раз. Трехгодичная проморозка отодвигает срок включения холодильного оборудования на больше чем год.

Рис. 2 демонстрирует влияние сезонного колебания температуры атмосферного воздуха через кровлю камеры на тепловые нагрузки на холодильное оборудование. Как видно из графиков, углубление камеры хранения с 10 до 20 м сокращает теплопритоки на величину от 43% (1-й год эксплуатации) до 18% (10-й год эксплуатации). Соответственно снижаются требуемая мощность холодильных машин и энергозатраты на выработку искусственного холода.

На рис. 3 представлены графики влияния продолжительности проморозки естественным холодом на теплопритоки в камеру. Рассмотрены 3 варианта продолжительности проморозки: 2 месяца (декабрь, январь), 4 месяца (с ноября по февраль) и 7 месяцев (с конца сентября до конца апреля). Проморозка проводится с интенсивностью подачи холодного воздуха в объеме  $15 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Из рисунка видно, что увеличение продолжительности предварительной проморозки атмосферным холодом в зимний период уменьшает теплопритоки из окружающего массива в течение первых 4 лет эксплуатации подземного криохранилища.

На рис. 4 представлены графики влияния интенсивности предварительной проморозки на

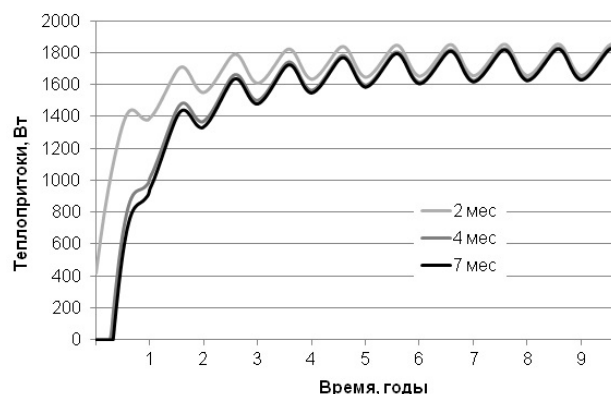


Рис. 3. Теплопритоки в камеру при разных продолжительностях предварительной проморозки атмосферным холодом

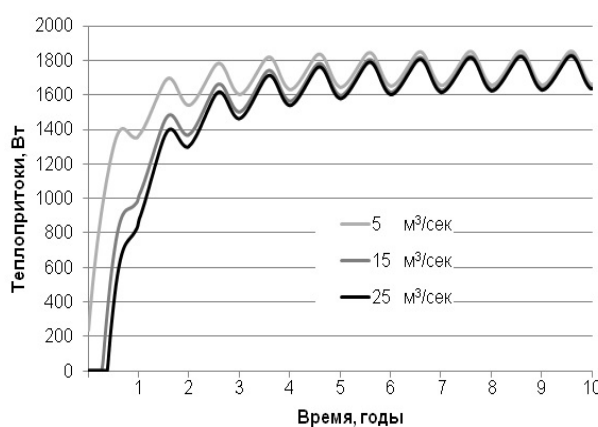


Рис. 4. Теплопритоки в камеру хранения при разных интенсивностях предварительной проморозки атмосферным холодом

тепловые нагрузки на холодильное оборудование.

Из рисунка видно, что увеличение расхода воздуха с  $5$  до  $25 \text{ м}^3/\text{с}$  сокращает тепловые нагрузки на холодильное оборудование и энергозатраты на выработку искусственного холода в первый год эксплуатации на 67%, а во второй год на 22%.

### Заключение

Результаты проведенных численных исследований на математической модели подтверждают возможность прогрессирующего из года в год накопления холода породным массивом, вмещающим выработки подземного криохранилища, при правильно организованной проморозке и хладозарядке атмосферным холодом в зимнее время.

Исследователями рекомендуется наиболее надежный комбинированный способ регулирования теплового режима подземного криохрани-

лица, при котором используются атмосферный холод зимой и холодильные машины летом. При использовании этого способа уже в первые годы эксплуатации вновь построенного хранилища можно значительно снизить энергозатраты на выработку искусственного холода.

#### Литература

1. Гончаров Н.П., Иванов Б.И., Кершенгольц Б.М. и др. Сохранение гермиплазмы возделываемых растений и их диких сородичей в вечной мерзлоте // Материалы Всероссийской научн. конф. «Проблемы изучения и сохранения растительного мира Евразии» (Иркутск, 15–19 сент. 2010). – Иркутск, 2010. – С.575–578.
2. Solomonov N.G., Kerschenglols B.M., Ivanov B.I. et al. The project of creation international cryostorage of gene pool of plants and animals in conditions permafrost soils of Yakutia // «Cryo–2010». 47th Annual Meeting of

the Society for Cryobiology. July 17–20 2010. №S025. – P.13 Bristol Marriott Royal Hotel, UK. – P. 13.

3. Рекомендации по строительству, реконструкции и эксплуатации подземных холодильников Якутской АССР. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1982. – 50 с.

4. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

5. Щербань А.Н., Кремнев О.А., Журавленко В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт. – М.: Недра, 1977. – 359 с.

6. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). – 2-изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.

7. Самарский, А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычисл. математики и мат. физики. – 1965. –Т. 5, № 5. – С. 816– 827.

Поступила в редакцию 18.01.2012

УДК: 622.33:338 (004) (571.56)

## Улучшение качества угля за счет селективной разработки сложноструктурного Эльгинского каменноугольного месторождения

С.А. Ермаков, В.Л. Гаврилов, Д.В. Хосоев, Е.А. Хоютанов

*Приведены горно-геологические условия Эльгинского каменноугольного месторождения. Выполнен анализ отечественного и мирового опыта селективной разработки сложноструктурных месторождений. Проведена оценка изменения зольности угля при валовой и селективной разработке сложноструктурных пластов Эльгинского месторождения с использованием комбайнов типа KSM.*

Ключевые слова: уголь, валовая и селективная выемка, зольность, технология.

*Mining and geological conditions of coal deposit Elginskoe are presented. Domestic and world experience of selective mining of complex structure fields is analyzed. The estimation of coal ash variation at the gross and selective mining of complex structure seams of Elginskoe deposit with the use of KSM combines is carried out.*

Key words: coal, gross and selective extraction, ash content, technology.

Эльгинское месторождение по запасам углей, их качеству и горно-геологическим условиям эксплуатации относится к группе уникальных. Так, его угли отличаются низким содержанием серы (0,3%) и фосфора (0,005%), высокой спекаемостью в неокисленной зоне. В то же

время высокая зольность в сочетании с трудной или очень трудной обогатимостью обуславливает необходимость применения новых технологий, позволяющих производить селекцию при добыче угля.

Комплекс известных сведений позволяет однозначно отнести Эльгинское месторождение к разряду наиболее ярких представителей месторождений с весьма сложной структурой. Углевмещающая часть, предназначенная для открытых горных работ, общей мощностью 200 м содержит 22 угольных пласта в основном с положим залеганием 2–5°, представленных двумя свитами, связанными с промышленной угленос-

ЕРМАКОВ Сергей Александрович – к.т.н., с.н.с. ИГДС СО РАН, s.a.ermakov@igds.ysn.ru; ГАВРИЛОВ Владимир Леонидович – к.т.н., с.н.с. ИГДС СО РАН, gvlugorsk@mail.ru; ХОСОЕВ Доржи Владимирович – вед. инженер ИГДС СО РАН, dorgi\_ho@mail.ru; ХОЮТАНОВ Евгений Александрович – аспирант ИГДС СО РАН, evgeni\_h@nm.ru.