

ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.015:622.33

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ХРАНЕНИЯ МЕРЗЛОГО УГЛЯ НА ОТКРЫТЫХ СКЛАДАХ

Ю. А. Хохолов¹, В. Л. Гаврилов², В. И. Федоров¹

¹Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,

E-mail: khokholov@igds.yasn.ru, просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия

²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: gvlugorsk@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Разработана методика моделирования протекающих в летний период года тепломассообменных процессов в штабелях открытого хранения, которые сформированы из мерзлого добытого зимой угля, учитывающая влияние теплофизических свойств угля и грунтов основания склада, его строение, климатические факторы, наличие теплоизолирующего покрытия над слоем угля. На примере центральных районов Якутии показано, что максимальный объем угля, переходящего из мерзлого состояния (заложение склада – январь-март) в талое при высоте штабеля более 5 м, составит на конец теплого времени года (начало октября) 25–35%. Применение простых и доступных теплоизоляционных материалов снижает интенсивность оттаивания до 2 раз. Использование естественного холода при хранении угля на складах уменьшает негативное влияние окислительных процессов на его качество при длительном хранении и поставках в труднодоступные и удаленные районы.

Криолитозона, уголь, хранение, открытый склад, окисление, моделирование, тепломассообмен, Центральная и Северная Якутия

DOI: 10.15372/FTPRPI20190617

Смещение центра основного потребления угля в мире в страны азиатско-тихоокеанского побережья и истощение сырьевой базы угля в регионах традиционной добычи в России способствуют поэтапному перемещению предприятий отрасли в восточные и северные районы, включая арктические. Для этих территорий характерны длительные и холодные зимы, наличие и широкое распространение многолетнемерзлых пород, низкий уровень развития энергетической, транспортной и логистической инфраструктуры. Для накопления, хранения и перегрузки топлива в территориально рассредоточенных, удаленных и сложных цепочках его добычи и поставок широко используются различные открытые склады. Это могут быть базовые и расходные штабели различной конструкции и емкости на разрезах, шахтах, котельных, ТЭЦ, пунктах аккумуляирования и перевалки на железнодорожных станциях, берегах рек, автомобильных пунктах.

Добытый уголь при длительном хранении и транспортировке подвержен физико-химическому выветриванию, которое ухудшает потребительские свойства топлива, включая теплотворную способность, способствует потере веса, изменению гранулометрического состава с уменьшением крупных классов в пользу мелких. Степень влияния этих процессов зависит от уровня метаморфизма исходного сырья, скорости притока кислорода, дополнительного увлажнения или высыхания, порядка формирования штабелей, условий хранения, природных и климатических особенностей регионов [1 – 7; и др.].

Влияние комплекса экстремальных факторов, усложняющих и удорожающих разработку месторождений твердых полезных ископаемых в восточных и северных регионах, часто учитывается не в полной мере, в том числе из-за недостатка или отсутствия необходимых знаний о специфике объектов освоения. При совершенствовании работы горнотехнических систем возможности использования условно благоприятных свойств окружающей среды, включая криолитозону как элемент криосферы, также недооцениваются. Как следствие, потенциальные технологические и организационные резервы управления, вытекающие из лучшего понимания природных процессов, не выявляются и не реализуются. Это касается и того, что при отрицательных и низких положительных температурах воздуха и пород процессы физико-химического выветривания сильно замедляются, а возможности использования холода, накопленного углем в зимний период, для улучшения условий хранения его на складах в теплое время года применяются редко.

Окисление углей, хранящихся в открытых штабелях, протекает нелинейно в два этапа: интенсивного роста и замедления [6, 7]. Длительность первого этапа подъема температуры и скорость ее достижения имеют корреляционную зависимость от степени метаморфизма углей. Существуют экстремумы для углей с выходом летучих веществ в диапазоне $V^{daf} = 27.3 - 30.5\%$, говорящие о разном механизме окисления углей с различным метаморфизмом. Скорости достижения точки перехода от первого этапа ко второму в летнее и зимнее время для углей различных марок не совпадают. В криолитозоне массивы, консервируемые льдом, за редким исключением отличаются низкой воздухопроводимостью и теплообменом, невысокой интенсивностью реакций окисления. Скорость химического выветривания мерзлых пород существенно ниже, чем при аналогичном выветривании пород, имеющих положительные температуры [8]. В данной ситуации изучение характера протекания теплообменных процессов в мерзлом угле в штабелях на открытых складах в летний сезон для улучшения условий его хранения приобретает дополнительную актуальность.

Анализ рекомендуемых способов и условий хранения угля на открытых складах, регламентируемых рядом инструкций [9 – 11], показывает, что при строительстве и эксплуатации складов для максимального снижения потерь от окисления, переизмельчения, уноса и вымывания должны учитываться требования, обусловленные физико-химическими свойствами топлива, климатическими условиями и сроками хранения. Топливо на складе укладывается в штабели в форме усеченной пирамиды, полусферы, прямоугольного параллелепипеда, конуса. При хранении качественные потери, связанные с окислением органической части угля кислородом воздуха, не нормируются. По склонности к окислению угли разделяются на четыре группы: наиболее устойчивые, устойчивые, средней устойчивости, неустойчивые с повышенной активностью. Предельные сроки хранения для этих групп составляют 24 – 36, 18, 12 и 4 – 8 мес соответственно [10]. При применении регламентированной [11] технологии закладки в уплотненные штабели предельные сроки хранения углей могут составлять 6 лет, 4, 3 и 2 года соответственно (угли канско-ачинские — 1 год). Максимальная высота штабелей по группам: I — не ограничена, II — до 10 м, III — до 6 м, IV — до 5 м. На немеханизированных складах для

углей групп III и IV допускается высота до 2.5 м при ширине штабеля не более 20 м. В северных районах с целью уменьшения окисления угля возможно проводить закладку малоустойчивых углей в зимнее время на ледяные основания толщиной 20–25 см и изоляционным слоем из мелкого угля толщиной не менее 0.75 м, для верхнего покрытия штабеля достаточно намораживать слой льда 3–5 см [10]. В качестве мероприятий по снижению окисляемости малоустойчивых углей в особых случаях предусмотрено хранение в траншеях, буртах, под несгораемыми навесами.

Теплообменные процессы, протекающие при положительных и отрицательных температурах в горном массиве, взорванных горных породах в развале, полезном ископаемом, размещаемом на складах, многообразны и сложны [5–8, 12, 13]. На складах их характер и интенсивность зависят от множества факторов, связанных с различиями потребительских свойств хранимого угля, природно-климатических условий, порядка размещения и формирования складов, их конструктивных параметров и особенностей эксплуатации.

Ввиду сложности и трудоемкости решения многих вопросов горной теплофизики экспериментальным путем и физическим моделированием, исследования теплообменных процессов в штабеле с мерзлым углем проводились на разработанной математической модели. Цель настоящей работы — построение математической модели и выявление закономерностей теплообменных процессов, происходящих в штабеле с углем при его размещении на открытом воздухе. Полученные результаты могут послужить основой в качестве практических рекомендаций по управлению тепловыми процессами на складах для снижения негативного физико-химического выветривания добытого угля и сохранения его качества.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В УГОЛЬНОМ ШТАБЕЛЕ

Расчеты и построения выполнены для штабелей угля высотой 5–10 м и климатических условий г. Якутска, которые характеризуются длительным и холодным зимним периодом, коротким и жарким летом с большим числом солнечных дней и белыми ночами. Такие же условия свойственны и для расположенных в центральной части Якутии разрезов Джебарики-Хая, Харбалахский, Кангаласский, Мироновский, Кировский, Кемпендяйский. Схема для расчета температурного режима штабеля угля в форме трапеции приведена на рис. 1.

Модель учитывает теплофизические характеристики угля и грунтов основания склада, их температуру и влажность, неоднородное строение массива пород, изменение температуры наружного воздуха, скорость ветра, высоту снежного покрова, тепловой поток от солнечной радиации, момент времени закладки, наличие теплоизолирующего слоя над верхним слоем угля и т. д. Принято следующее допущение: уголь закладывается в штабель в зимний период с температурой, равной температуре атмосферного воздуха в момент закладки.

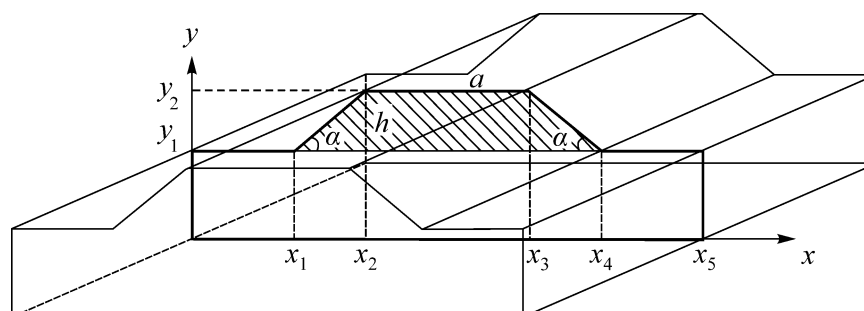


Рис. 1. Схема для температурного расчета штабеля угля: a — ширина на верхней границе, м; h — высота, м; α — угол откоса штабеля, град

Решение задачи произведем в плоской постановке. Выполним расчет температурного режима угля в штабеле по отдельным периодам теплого времени года для оценки характера и уровня потерь холода при длительном хранении. Процесс распространения тепла в штабеле угля и массиве горных пород с учетом фазовых переходов влаги описывается уравнением

$$[C(T) + L_1 W \rho \delta(T - T^*)] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (1)$$

$$C(T) = \begin{cases} c_1 \rho_1, & T < T^*, \\ c_2 \rho_2, & T > T^*, \end{cases} \quad \lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T^*, \\ \lambda_2, & T > T^*. \end{cases}$$

Здесь T, T^* — температура породы и фазовых переходов влаги, °С; t, x — временная (с) и пространственная (м) координаты; L_1 — скрытая теплота плавления (замерзания) льда (воды), Дж/кг; W — влажность породы, дол. ед.; ρ — плотность скелета породы (угля), кг/м³; c_1, ρ_1, λ_1 (c_2, ρ_2, λ_2) — удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м³) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) соответственно для мерзлых (талых) пород и угля; $\delta(T - T^*)$ — функция Дирака, 1/К. Фазовые переходы влаги в угле и породе учитываются с помощью δ -функции Дирака [14].

Для решения одномерной задачи “промерзания – протаивания” в постановке вида (1) используем численные методы сквозного счета со сглаживанием коэффициентов [15]. В начальный момент времени задается распределение температур $T(x, 0) = T_0$, на дневной поверхности — граничное условие III рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha [T - T_a(t)] - Q_R + L_2 E,$$

где α — коэффициент теплоотдачи от атмосферного воздуха к массиву горных пород, Вт/(м²·К); Q_R — тепловой поток от солнечной радиации (радиационный баланс), Вт/м²; L_2 — удельная теплота испарения воды, Дж/кг; E — интенсивность испарения, равная плотности диффузионного потока влаги в атмосферу, кг/(м²·с).

Изменение температуры воздуха за зимний и летний периоды представим в виде полусинусоиды:

$$T_a^z(t) = \frac{\pi \Omega_z}{2\tau_z} \sin\left(\frac{\pi t}{t_z}\right), \quad T_a^l(t) = \frac{\pi \Omega_l}{2\tau_l} \sin\left(\frac{\pi t}{t_l}\right),$$

здесь t — время, ч; Ω_z, Ω_l — суммы градусо-часов температуры воздуха за зимний и летний периоды; t_z, t_l — продолжительности зимнего и летнего периодов, ч [16]. Здесь принято считать, что зимний период года наступает при достижении температуры атмосферного воздуха ниже 0 °С. Соответственно, летний период наступает при росте этой температуры выше нулевой отметки. Параметры $\Omega_z, \Omega_l, t_z, t_l$ вычисляются на основе данных стационарных метеонаблюдений. Для метеостанции “Якутск”: $\Omega_z = -133776$ градусо-ч; $\Omega_l = 50364$ градусо-ч; $t_z = 5548$ ч; $t_l = 3212$ ч [16].

На глубине массива горных пород, превышающей глубину затухания колебаний температуры, температура принимается равной естественной температуре пород: $T = T_e, y = 0$. На боковых границах области задаются граничные условия II рода:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad 0 \leq y \leq y_2, \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad x = x_5, \quad 0 \leq y \leq y_2.$$

Коэффициент теплообмена атмосферного воздуха с поверхностью массива горных пород в зимний период зависит от толщины снежного покрова и определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_s}{\lambda_s}},$$

где δ_s , λ_s — толщина (м) и коэффициент теплопроводности снега (Вт/(м·К)); α_0 — эмпирический коэффициент конвективного теплообмена (Вт/(м²·К)), рассчитываемый по формуле Юргенса:

$$\alpha_0 = \begin{cases} 6.16 + 4.19\nu, & 0 < \nu \leq 5, \\ 7.56\nu^{0.78}, & 5 < \nu \leq 30, \end{cases}$$

ν — скорость ветра, м/с [17].

Для расчета α необходимы данные по месяцам о коэффициенте теплопроводности λ_s и высоте δ_s снежного покрова. В [18] на основе большого объема экспериментальных материалов получены осредненные зависимости для нахождения расчетных значений:

$$\lambda_s = \begin{cases} 1.165\rho_s, & T_s > -10^\circ\text{C}, \\ 1.035\rho_s, & -10^\circ\text{C} \geq T_s \geq -20^\circ\text{C}, \\ 0.907\rho_s, & T_s < -20^\circ\text{C}. \end{cases}$$

Здесь T_s , ρ_s — температура и плотность снежного покрова, г/см³. Плотность снега рассчитывается по формуле Э. Г. Коломыца $\rho_s = 0.182 + 0.180\delta_s$ [19]. Отметим, что плотность снега не является постоянной величиной и быстро меняется в период весеннего таяния от 0.35 в начале, 0.45 в середине и 0.60 г/см³ в конце снеготаяния.

Радиационный баланс, являющийся результирующей лучистого теплообмена у поверхности Земли, определяется зависимостью $Q_R = Q_c(1 - A) - I_{\text{эф}}$, где Q_c — суммарная коротковолновая радиация, Вт/м²; A — альbedo поверхности, представляющее собой отношение отраженной радиации к суммарной Q_c ; $I_{\text{эф}} = I_{\text{п}} - I_{\text{а}}$ — эффективное излучение, Вт/м², $I_{\text{п}}$, $I_{\text{а}}$ — излучение поверхности Земли и атмосферы, Вт/м² [18, 20].

Детальная оценка составляющих теплового баланса деятельной поверхности в годичном ходе климатических параметров для характерных мерзлотно-климатических условий района размещения склада осуществляется по данным теплораспределительных стационаров, где проводятся в полном объеме актинометрические и градиентные наблюдения за суммарной, рассеянной и поглощенной радиацией, радиационным балансом, температурой и влажностью воздуха, скоростью ветра на разных высотах.

Суммарная радиация включает в себя прямую радиацию на горизонтальную поверхность и рассеянную. В разное время года процентное отношение этих составляющих различно. С уменьшением высоты солнца и увеличением облачности доля рассеянной радиации возрастает. В зимние месяцы (с октября по февраль) в приходе суммарной радиации доля рассеянной больше, чем прямой; в декабре прямая радиация практически не поступает, а с марта по сентябрь она несколько преобладает. В отдельные годы месячные и годовые суммы радиации могут испытывать существенные отклонения от средних значений.

Солнечная радиация, приходящая на земную поверхность, поглощается в зависимости от альbedo поверхности, на которую она поступает. В прямой зависимости от альbedo находится и радиационный баланс. В табл. 1 приведены месячные суммы радиации (прямая и рассеянная), эффективного излучения и среднее интегральное альbedo для всего спектра солнечного излучения в г. Якутске [21]. С ноября по март отражается более 80 % радиации, приходящей к земной поверхности, с мая по сентябрь — менее 20 %. В среднем за год альbedo составляет 34 %. Таким образом, годовой ход альbedo противоположен годовому ходу суммарной радиации. Затраты тепла на испарение составляют для положительных температур атмосферного воздуха 108.2 кДж/(период·м²), для отрицательных — 11.6 [18].

ТАБЛИЦА 1. Месячные суммы радиации и среднее альbedo

Показатель	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Суммарная коротковолновая радиация, Вт/м ²	58.7	234.6	561.5	632.7	582.4	699.7	657.8	527.9	372.9	180.2	100.6	29.3
Альbedo, %	80.0	83.0	80.0	56.0	16.0	18.0	18.0	19.0	20.0	51.0	82.0	79.0
Эффективное излучение, Вт/м ²	33.5	41.9	75.4	100.6	180.2	192.7	184.4	155.0	129.9	67.0	41.9	25.1

Для численного решения задачи теплообмена массива горных пород с атмосферным воздухом применялся общеизвестный метод сглаживания, а для решения двухмерной задачи теплообмена — метод суммарной аппроксимации, сводящий исходную задачу к последовательности одномерных задач [15, 22, 23]. Разностные схемы удовлетворяли условиям аппроксимации и устойчивости. На каждом временном слое решалась последовательность одномерных задач. Все системы разностных уравнений выводились с учетом геометрии рассматриваемой области. Расстояние в модели до боковых границ выбиралось исходя из затухания колебаний температуры.

Для прогноза температурного режима штабеля угля необходимо иметь данные о радиационном режиме различно ориентированных наклонных поверхностей. Основная задача состоит в определении потоков прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, поступающей на наклонные поверхности, а также в оценке их полного радиационного баланса. Исследования показали, что составляющие радиационного баланса удобно определять через значения этого параметра горизонтальной поверхности, используя расчетные методики или эмпирические связи. Такой подход важен, так как радиационный режим горизонтальной поверхности в настоящее время подробно изучен для многих районов Земли.

Средние многолетние значения потоков и суммарных значений прямой радиации для горизонтальной поверхности и вычисленные относительные коэффициенты для различно ориентированных наклонных поверхностей позволяют определять возможные и характерные для данного района значения этих параметров, поступающих на наклонные поверхности [24]. Для расчетов используются данные актиметрических станций и продолжительности солнечного сияния, а также высота солнца, угол падения солнечных лучей на поверхность склона. В табл. 2 приведены коэффициенты для перехода от сумм прямой солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, к суммам радиации, получаемой склонами различной крутизны на широте 62°, ориентированных на Ю, ЮВ, В, СВ, С, СЗ, З и ЮЗ. В табл. 3 представлены расчетные коэффициенты для склона с крутизной 36°, соответствующей углу естественного откоса в различные месяцы года.

ТАБЛИЦА 2. Коэффициенты для перехода от сумм прямой солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, к суммам радиации, получаемой склонами различной крутизны

Ориентация	Угол склона							
	30°				45°			
	III	VI	IX	Год	III	VI	IX	Год
С	—	0.71	0.06	0.48	—	0.46	—	0.27
СВ	0.36	0.78	0.46	0.65	0.27	0.64	0.38	0.50
В	1.04	0.95	1.00	0.98	1.02	0.90	1.00	0.95
ЮВ	1.65	1.07	1.46	1.28	1.81	1.02	1.58	1.32
Ю	1.90	1.05	1.67	1.35	2.19	1.00	1.83	1.43
ЮЗ	1.67	1.02	1.44	1.24	1.84	0.96	1.54	1.27
З	1.05	0.98	0.96	0.95	1.03	0.84	0.95	0.90
СЗ	0.39	0.74	0.43	0.61	0.28	0.56	0.33	0.49

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ полученных изолиний температур в штабеле угля с формой сечения в виде трапеции и в массиве горных пород под ним показывает, что при повышенной солнечной инсоляции южная сторона нагревается более интенсивно по сравнению с северной (рис. 2а). Аналогичная картина формируется и в штабелях угля с поперечным сечением в форме треугольника (рис. 2б). При расчетах объем угля в разных штабелях принимался равным, изменялась высота штабеля (5 м для варианта 1 и 6.6 м — для варианта 2).

Рассмотрение графиков изменения доли талой зоны во времени при различной ориентации длинной стороны штабеля (запад – восток, север – юг и др.) и закладке в разное время года показывает, что из-за низкого коэффициента теплопроводности угля разница в результатах расчетов незначительная. Однако небольшое преимущество имеет вариант, при котором штабель по длине ориентирован на запад – восток (рис. 3а, б). Изучение процесса изменения доли талой зоны и хладосодержания в угле при разных формах штабеля показывает, что штабель угля в форме треугольника в сечении имеет небольшое преимущество из-за меньших потерь холода (рис. 3в, г).

Одним из вариантов снижения потерь холода в штабеле является теплоизоляция его поверхностного слоя от воздействия солнечной энергии. Расчеты свидетельствуют о том, что при наличии теплоизоляции, например из древесных опилок, оттаивание угля замедляется (рис. 4).

ТАБЛИЦА 3. Коэффициенты для перехода от сумм прямой солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, к суммам радиации, получаемой склонами с крутизной 36°

Ориентация	Месяц						
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
С	0.00	0.19	0.39	0.58	0.31	0.17	0.03
СВ	0.31	0.44	0.58	0.71	0.61	0.52	0.42
В	1.03	1.00	0.96	0.93	0.95	0.98	1.00
ЮВ	1.73	1.50	1.27	1.04	1.20	1.36	1.52
Ю	2.04	1.80	1.57	1.33	1.47	1.61	1.75
ЮЗ	1.76	1.48	1.21	0.99	1.18	1.33	1.49
З	1.04	1.00	0.95	0.91	0.93	0.94	0.96
СЗ	0.82	0.76	0.70	0.65	0.56	0.47	0.38

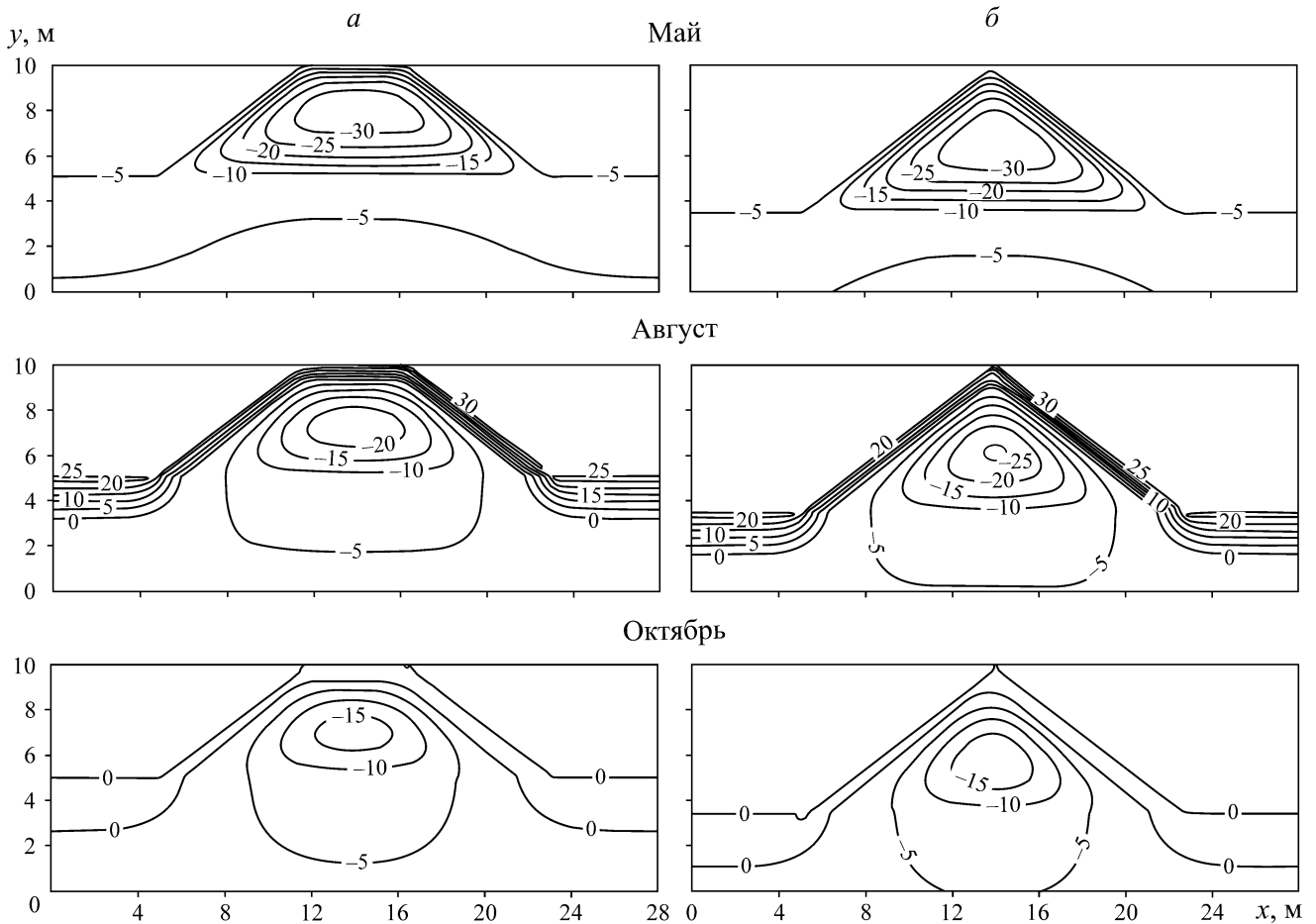


Рис. 2. Изолинии температур в штабеле угля с сечением в форме трапеции (а) и треугольника (б) в начале мая, августа и октября

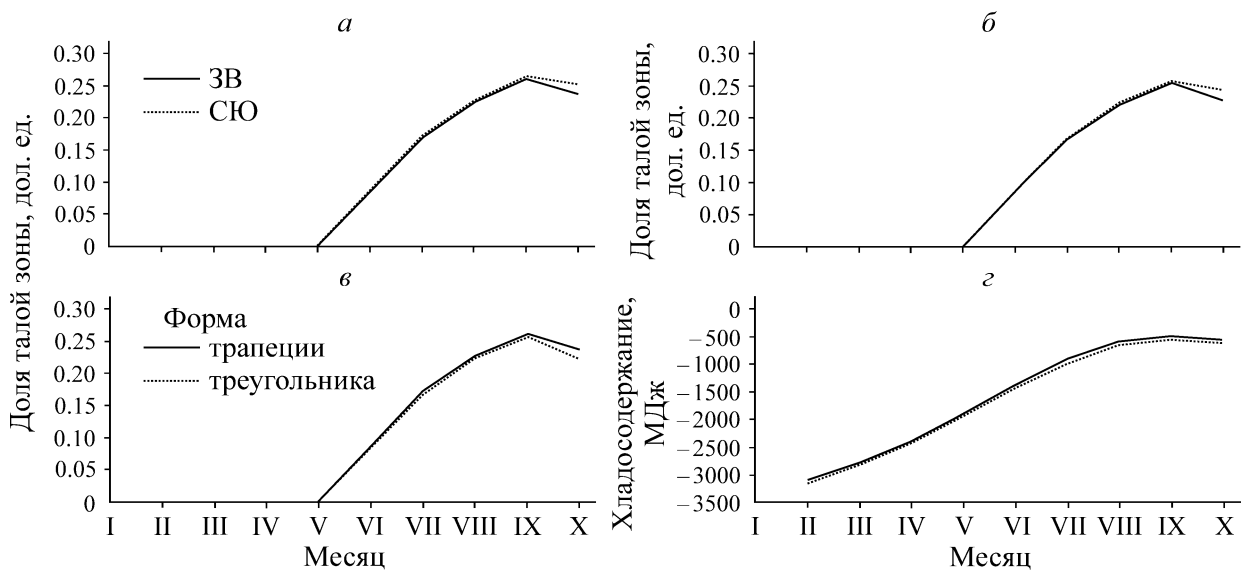


Рис. 3. Изменение доли талой зоны в штабеле угля при закладке в январе (а) и марте (б) и изменение доли талой зоны (в) и хладосодержания в угле (з) при разных формах штабеля

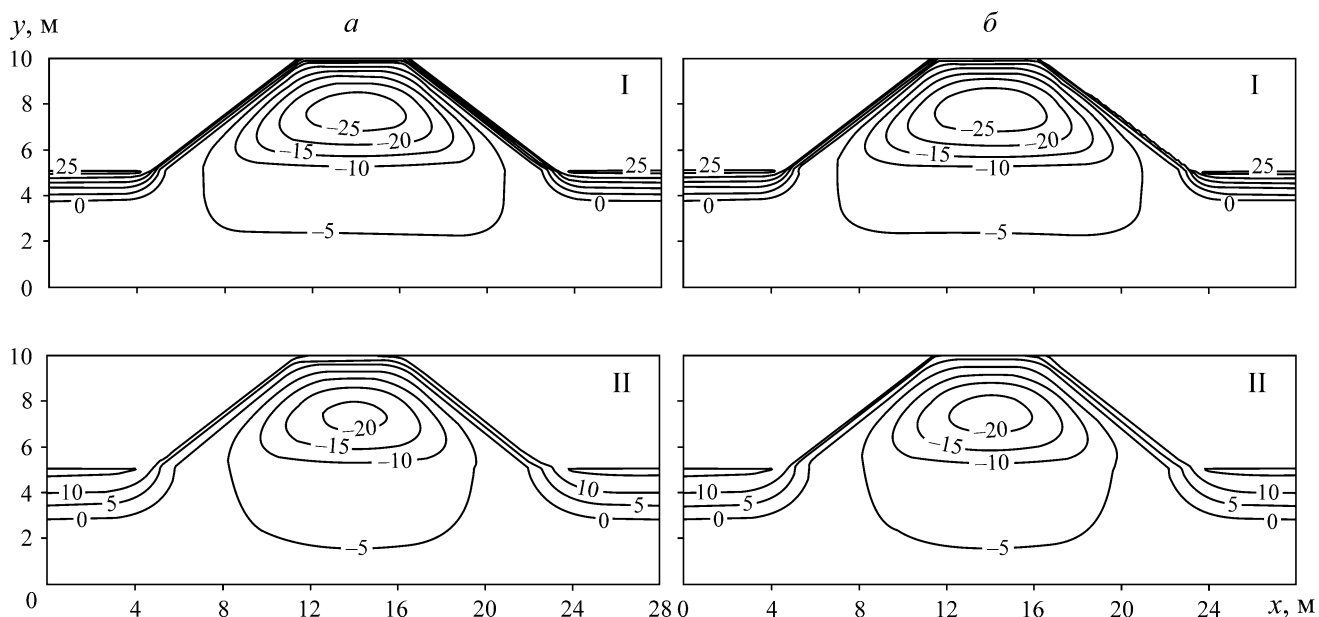


Рис. 4. Температурные изолинии в штабеле угля в начале июля (I) и начале сентября (II) с теплоизоляцией толщиной 0.1 (а) и 0.2 м (б)

Без теплоизоляции протаивание штабеля начинается в мае, при толщине теплоизоляции 0.1 м — с конца мая, а при толщине 0.2 м — в начале июня (рис. 5а). К началу октября доля талой зоны составляет без теплоизоляции 25–27%, при наличии теплоизоляции 0.1 м — 18%, а при толщине 0.2 м — 12%. Теплоизоляция поверхности угля сокращает потери холода штабелем, уменьшает долю талой зоны, что обеспечивает более высокий уровень сохранности угля (рис. 5б). Применение более эффективных видов теплоизоляции из вспененных природных или искусственных материалов, а также светоотражающих и светозащитных конструкций дает возможность дополнительной защиты штабелей от воздействия солнечной радиации.

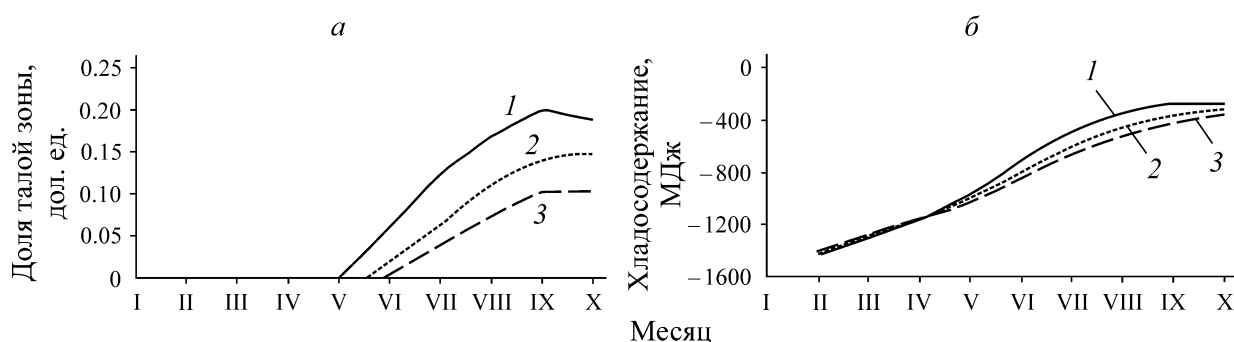


Рис. 5. Изменение доли талой зоны (а) и хладосодержания в штабеле угля (б) при разной толщине теплоизоляции: 1 — без изоляции; 2 — 0.1 м; 3 — 0.2 м

Замедление окислительных процессов в угле, закладываемом в штабели в мерзлом состоянии в конце зимнего периода, способствует снижению его качественных потерь. Сохранение отрицательных или низких температур в штабелях позволяет исключить или сократить число фазовых переходов, ведущих к эффекту криогенной деструкции [8, 25]. Результатом такого снижения является то, что в угле, размещаемом в штабелях, останется больше крупных классов, использование которых улучшает параметры работы слоевых топков в котельных. Предло-

женный подход к моделированию условий хранения угля может использоваться и для других видов полезных ископаемых, склонных к окислению, а также при рассмотрении вопросов криогенной подготовки минерального сырья к обогащению.

ВЫВОДЫ

Использование естественного холода при хранении угля на открытых складах позволяет снизить негативное влияние процессов физико-химического выветривания на его качество. Это важно для цепочек поставок, использующих сложную и длительную по срокам логистику, включая труднодоступные и удаленные районы Якутии. На протяжении всего теплого сезона основная масса угля в штабеле может оставаться в мерзлом состоянии. Влияние направления ориентации большей по длине стороны штабеля на размер и долю талой зоны в нем незначительное. Стороны штабелей, ориентированные на солнечную сторону, нагреваются более интенсивно. Форма штабеля не оказывает значимого для практики влияния на изменение доли талой зоны и хладосодержания в угле. Важным направлением управляемого снижения потерь холода в штабеле является теплоизоляция его поверхностного слоя. Без теплоизоляции протаивание штабеля начинается в мае, при использовании доступных древесных опилок толщиной 0.1–0.2 м для укрытия штабеля этот срок сдвигается минимум на месяц, а интенсивность прогревания угля и перехода его в размороженное состояние значительно замедляется. Использование естественного холода позволяет снизить вероятность самонагрева и самовозгорания углей при длительном складировании и транспортировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрисанфова А. И., Литвинов В. Л. Технология хранения углей и мероприятия по сокращению потерь топлива. — М.: Недра, 1970. — 192 с.
2. Равич М. Б. Эффективность использования топлива. — М.: Наука, 1977. — 344 с.
3. Роддатис К. Ф., Полтарецкий А. Н. Справочник по котельным установкам малой производительности. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 488 с.
4. Десна Н. А., Мирошниченко Д. В. Использование окисленных углей при коксовании (обзор) // Кокс и химия. — 2015 — № 5. — С. 2–9.
5. Горюшинский В. С., Губарев М. П., Шулепов В. В. Совершенствование погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских операций с твердым топливом на экипировочных пунктах станций // Вестн. транспорта Поволжья. — 2008. — № 3. — С. 40–46.
6. Мирошниченко Д. В., Десна Н. А., Кафтан Ю. С. Исследование процесса окисления углей в промышленных условиях. Сообщение 2. Изменение пластично-вязких свойств углей при окислении // Кокс и химия. — 2014. — № 10. — С. 2–8.
7. Мирошниченко Д. В., Десна Н. А., Кафтан Ю. С. Исследование процесса окисления углей в промышленных условиях. Сообщение 4. Температура угля в штабеле // Кокс и химия. — 2015. — № 2. — С. 2–8.
8. Шестернев Д. М. Физическое и химическое выветривание массивов горных пород в криолитозоне // ГИАБ. — 2017. — № 3. — С. 350–360.
9. Инструкция по эксплуатации складов для хранения угля на шахтах, карьерах, обогатительных фабриках и сортировках № 67 от 10 февраля 1970 г. — М.: Минуглепром СССР, 1970. — 28 с.
10. Инструкция по хранению каменноугольного топлива на теплоэнергетических предприятиях местных советов депутатов трудящихся РСФСР № 65 от 14 февраля 1974 г. с изменениями от июля 2011 г. Ми-

нистерство жилищно-коммунального хозяйства РСФСР — http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_8255.htm (дата обращения 05.07.2019 г.).

11. РД 34.44.101-96. СО 34.44.101-96. Типовая инструкция по хранению углей, горючих сланцев и фрезерного торфа на открытых складах электростанций // РАО ЕЭС России. — М.: СПО ОРГРЭС, 1996. — 37 с.
12. Смирнова Н. Н., Николаева Н. В., Бричкин В. Н., Кусков В. Б. Аналитические решения некоторых задач теплообмена в процессах горного производства // ФТПРПИ. — 2014. — № 1. — С. 80–86.
13. Каймонов М. В., Панишев С. В. Моделирование динамики температурного поля многолетнемерзлых горных пород карьеров после взрывной отбойки // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 185–191.
14. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1977. — 736 с.
15. Самарский А. А., Моисеенко Б. Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. вычисл. математики и мат. физики. — 1965. — Т. 5. — № 5. — С. 816–827.
16. Фельдман Г. М., Тетельбаум А. С., Шендер Н. И., Гаврильев Р. И. Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии. — Якутск: ИМ СО АН СССР, 1988. — 240 с.
17. Куртнер Д. А., Чудновский А. Ф. Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 299 с.
18. Павлов А. В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. — Новосибирск: Наука, 1980. — 240 с.
19. Гаврильев Р. И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. — 146 с.
20. Перльштейн Г. З. Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР. — Новосибирск: Наука, 1979. — 304 с.
21. Климат Якутска / под ред. Ц. А. Швер, С. А. Изюменко. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 236 с.
22. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983. — 616 с.
23. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 784 с.
24. Кондратьев К. Я., Пивоварова З. И., Федорова М. П. Радиационный режим наклонных поверхностей. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 170 с.
25. Курилко А. С., Захаров Е. В., Попов В. И. Знакопеременные температурные воздействия как фактор энергосбережения для технологий комплексной подготовки рудного сырья в условиях криолитозоны // ГИАБ. — 2015. — № 5. — С. 84–91.

Поступила в редакцию 18/VII 2019

После доработки 26/XI 2019

Принята к публикации 27/XI 2019