

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАЗОГРЕВА ГРУЗОВ В КОНВЕКТИВНЫХ ГАРАЖАХ РАЗМОРАЖИВАНИЯ

Розглянуто процес розігрівання мерзлого вантажу. Розроблена методика визначення тривалості розігрівання залежно від величини мерзлого шара.

Рассмотрен процесс разогрева смерзшегося груза. Разработана методика определения продолжительности разогрева в зависимости от величины смерзшегося слоя.

The process of warming-up of a frozen load has been considered. A method is developed to determine duration of the warming-up process depending on the size of the frozen layer.

В зимний период при смерзании сырья, прибывающего в адрес агрофабрики, возникает необходимость включения в технологическую схему работы грузовой станции гаражей размораживания, что существенно осложняет работу станции и обуславливает значительное (в 2,5...3 раза) увеличение продолжительности обработки вагонов с сырьем [1–3].

Важным фактором совершенствования процесса обработки вагонов в зимний период является синхронизация работы станции и гаражей размораживания по их перерабатывающим возможностям. Однако для этого необходимо иметь достаточно надежную методику определения продолжительности разогрева груза, как основного фактора, определяющего перерабатывающую способность гаражей размораживания.

Согласно существующей технологии продолжительность разогрева груза определяется по нормативным данным, установленным с учетом температуры окружающей среды и продолжительности нахождения вагонов с грузом в пути следования. Проведенный сопоставительный анализ нормативной и фактической продолжительности разогрева показал существенные расхождения этих величин. Только в 25 % случаев нормативная и фактическая продолжительность разогрева совпадают, в 63 % случаев расхождение составляет 1...6 часов, а в 12 % случаев расхождение 6 часов и более.

Это обусловлено тем, что при установлении нормативов принимались усредненные данные не соответствующие конкретным условиям эксплуатации. Поэтому возникает необходимость определения продолжительности разогрева применительно к конкретным эксплуатационным условиям промышленных предприятий.

Из вышесказанного следует, что традиционный метод не дает возможности точно определить перерабатывающую способность гаражей размораживания и оптимально планиро-

вать оперативную работу грузовой станции в зимний период.

Анализ отечественных и зарубежных источников показал, что известны способы размораживания сырья в железнодорожных вагонах, в гаражах с конвективным теплообменом, в которых используются различные методы определения продолжительности его разогрева [4–7].

В [4] определение продолжительности разогрева угля в железнодорожных вагонах основывается на следующих факторах: среднесуточная температура воздуха (t °С), продолжительность транспортирования (T), прочность смерзания груза (P_{cp}), влажность груза (W) и объемная плотность груза (K).

В [5] продолжительность разогрева угля в железнодорожных вагонах основывается на температуре наружного воздуха ($t_{нв}$ °).

Известен способ разогрева рудосодержащего сырья в железнодорожном вагоне струями пара с большой скоростью истечения [6]. Для этого предварительно просверливаются каналы вглубь массива, а продолжительность разогрева основывается на следующих показателях: диаметр отверстия сопла (d) и давление пара (P) на различной глубине (h) промерзшего слоя.

Проведенный анализ [4–6] показал, что все рассмотренные способы характеризуются общим недостатком: расчетные показатели продолжительности разогрева смерзшегося груза существенно отличаются от фактических результатов.

Это обусловлено тем, что, в одном случае, [4; 5] способы основываются на сложных математических моделях прогнозирования продолжительности разогрева, принимающих в основу большое число переменных факторов, значительно различающихся по физической сущности и степени влияния на конечный результат. Поэтому вероятность получения надежных результатов невелика.

В другом случае [6] способ определения продолжительности разогрева ориентирован на наиболее неблагоприятные условия, в связи с чем расчетная продолжительность разогрева груза существенно увеличивается по сравнению с нормативной, действующей в настоящее время, что обуславливает значительный рост энергозатрат на разогрев.

Известен способ разогрева смерзшихся углей в железнодорожных вагонах, в котором продолжительность разогрева основана на определении температуры в самом слое угля специальными устройствами [7]. С этой целью необходимо выполнение нескольких замеров температуры груза – перед постановкой в гараж и в процессе разогрева, поскольку температура в массе груза распределена неравномерно. Кроме того, для измерения температуры используется достаточно сложное устройство. Все указанное усложняет применение данного способа и не обеспечивает получение досто-

верных результатов. Вместе с тем данный способ привлекает тем, что предварительно оценивается состояние самого смерзшегося груза, хотя температуру груза нельзя считать достаточно надежным показателем восстановления сыпучести груза.

На основании вышеизложенного возникает необходимость в разработке способа определения продолжительности разогрева смерзшегося груза. При этом весьма важным фактором становится оценка состояния груза перед постановкой в гаражи размораживания. Указанное может быть реализовано за счет введения входного контроля состояния груза перед постановкой в гаражи размораживания (рис. 1). Следовательно, в первую очередь, необходимо выбрать такой показатель, который в полной мере учитывал бы основные влияющие факторы, характеризовал степень смерзания груза и позволял достаточно точно определять продолжительность разогрева.



Рис. 1. Организация обработки вагонов со смерзшимся грузом перед подачей на вагоноопрокидыватель

Анализ показал, что теоретический путь решения поставленной задачи является весьма сложным. Поэтому в основу ее решения принимается экспериментальный метод с использованием методологии планирования эксперимента. Для изучения факторов, влияющих на продолжительность разогрева смерзшегося железорудного концентрата и аглоруды, наиболее целесообразно применение статистических методов планирования, которые значительно повышают эффективность экспериментальных исследований и позволяют при минимальном числе опытов получить экспериментально статистическую модель [8–11].

В качестве выходного параметра принята – продолжительность разогрева, ч. Входные факторы: x_1 – время в пути, ч; x_2 – температура окружающей среды, °С; x_3 – влажность груза, %. При этом в качестве верхнего и нижнего уровней принято: время в пути – 30...60 часов; температура окружающей среды – –2...–20 °С; влажность груза – 3...5 %, а общее количество опытов определялось исходя из количества факторов и количества уровней.

Основной объем разогрева смерзшегося груза приходится на железорудный концентрат и аглоруду. Так как эти грузы различаются между собой по физико-механическим свойствам, фракции и влажности, то экспериментальные исследования проведены отдельно для каждого груза.

При многофакторном эксперименте реализуются все возможные сочетания уровней факторов. Общее количество опытов N в матрице планирования определяется по выражению:

$$N = 2^k, \quad (1)$$

где k – число факторов; 2 – число уровней.

Условия проведения эксперимента заданы в виде матрицы планирования, в которой указано число опытов, которое необходимо выполнить, и значение факторов в каждом опыте, причем каждый фактор варьируется на двух уровнях +1 и –1 (для простоты записи единицы опустим).

Опыты реализуются в случайной последовательности, устанавливаемой с помощью таблицы случайных чисел. Условия проведения эксперимента и результаты опытов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Планирование эксперимента
при изучении факторов влияющих
на продолжительность разогрева смерзшегося
железородного концентрата и аглоруды**

Изучаемые факторы	Время в пути, ч	Температура окружающей среды	Влажность груза	Результаты опытов	
				$t, \text{ч}$	
Основной уровень (0)	45	-10	7		
Верхний уровень (+)	60	-2	3		
Нижний уровень (-)	30	-20	11		
Интервал варьирования	15	-11	4		
Кодовое обозначение	x_1	x_2	x_3	$y_T^{\text{конц}}$	$y_T^{\text{руда}}$
Опыт № 1 (7)	-	-	-	9	7
Опыт № 2 (3)	+	-	-	10	9
Опыт № 3 (1)	-	+	-	2	1
Опыт № 4 (2)	+	+	-	2	2
Опыт № 5 (8)	-	-	+	10	8
Опыт № 6 (4)	+	-	+	11	10
Опыт № 7 (6)	-	+	+	2	2
Опыт № 8 (5)	+	+	+	3	2
Опыт № 9	0	0	0	6	6
Опыт № 10	0	0	0	4	6
Опыт № 11	0	0	0	5	4

На первом этапе планирования эксперимента для предсказания направления градиента, т. е. направления, в котором величина выходного параметра оптимизации улучшается быстрее, чем в любом другом направлении, используется алгебраический полином первой степени – линейная модель.

Такая модель позволяет избежать полного перебора состояний объекта и тем самым уменьшить количество опытов, необходимых для отыскания оптимума. При этом нужно получить адекватную модель.

Поверхность отклика описана уравнением:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (2)$$

Правильность расчета коэффициентов проверяется путем введения в уравнение (2) их числовых значений вместо b_i , а вместо x_i – соответствующих знаков из какой-либо строки матрицы планирования. При этом значение выходного параметра, подсчитанное по уравнению, должно соответствовать его экспериментальной величине.

Значимость коэффициентов определяется путем сравнения их абсолютной величины с доверительными интервалами [11]. Результаты расчетов коэффициентов регрессии и доверительных интервалов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов коэффициентов регрессии и доверительных интервалов

Род груза	Доверительный интервал, $ b_i $	Коэффициенты регрессии							
		b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
Концентрат	0,812	6,13	0,38	-3,88	-0,38	0,13	0,13	-0,13	0,13
Руда	0,938	5,13	0,63	-3,38	0,38	-0,38	-0,13	-0,13	-0,13

Анализ результатов расчета коэффициентов регрессии и доверительных интервалов показал, что как для железородного концентрата, так и для аглоруды значимыми оказались коэффициенты регрессии b_0 и b_2 , следовательно, продолжительность разогрева железородного концентрата $y_T^{\text{конц}}$ и аглоруды $y_T^{\text{руда}}$ связана с температурой окружающей среды x_2 следующими уравнениями:

$$y_T^{\text{конц}} = 6,13 - 3,9 \cdot x_2, \quad (3)$$

$$y_T^{\text{руда}} = 5,13 - 3,4 \cdot x_2. \quad (4)$$

Причем в данных формулах значение положительной температуры не может быть использовано, исключение составляет температура $+1 \dots +1,5$ °С при условии, что груз на основной части маршрута следовал при температуре ниже 0 °С. Из уравнений (3) и (4) видно, что с повышением температуры сокращается продолжительность разогрева железородного концентрата и аглоруды.

После вычисления коэффициентов и проверки их значимости, проверяется адекватность уравнений регрессии, т. е. устанавливается, достаточно ли хорошо данное уравнение описывает поверхность отклика или необходима другая модель.

Адекватность уравнений регрессии проверена с использованием F – критерия Фишера:

- для железорудного концентрата

$$F_{\text{расч}} = 2,87; F_{\text{табл}} = 19,33;$$

- для аглоруды

$$F_{\text{расч}} = 2,13; F_{\text{табл}} = 19,33.$$

Так как условие $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$ выполняется, следовательно, уравнения (3) и (4) адекватно описывают исследованные области факторного пространства.

Согласно уравнениям регрессии (3) и (4) в практических условиях была определена продолжительность разогрева груза, т. е. с учетом температуры окружающей среды. Проведенный сопоставительный анализ продолжительности разогрева, рассчитанной по уравнениям регрессии (3) и (4) и фактической продолжительности разогрева показал существенные расхождения этих величин. Только в 19 % случаев фактическая продолжительность разогрева и рассчитанная по уравнениям регрессии (3) и (4) совпадают, в 67 % случаев расхождение составляет 1...6 часов, а в 14 % случаев расхождение 6 часов и более.

Такое расхождение обусловлено тем, что температура окружающей среды значительно колеблется в пункте погрузки, по маршруту следования груза и в пункте выгрузки. Так, при движении маршрутов концентрата и руды со

Стойленского месторождения в Мариуполь средняя температура по 40 маршрутам составляла в пункте погрузки $-22...18$ °С, по маршруту следования груза $-16...12$ °С, а в пункте выгрузки $-10...8$ °С. Кроме того в пункте выгрузки в связи с перешихтовкой аглофабрики маршруты с концентратом и рудой могут простаивать до 80 часов и более, в течение которых температура тоже изменяется как в сторону снижения, так и в сторону повышения, что в итоге осложняет определение точного времени разогрева груза.

Таким образом, экспериментальными исследованиями установлено, что определение продолжительности разогрева на основании температуры окружающей среды практически не может быть использовано. Проведенные исследования ставят новую задачу нахождения оценочного показателя для определения продолжительности разогрева, который учитывал бы совокупное влияние нескольких факторов.

На основе оценки совокупного влияния факторов интегративным показателем, влияющим на продолжительность разогрева, принимается прочность смерзания. Из вышеизложенного следует, что обязательной операцией перед постановкой подачи в гаражи размораживания является входной контроль прочности смерзания груза (рис. 2). Под прочностью понимается сопротивление материала (сырья) местной пластической деформации, возникающей при внедрении в него более твердого тела – индентора.

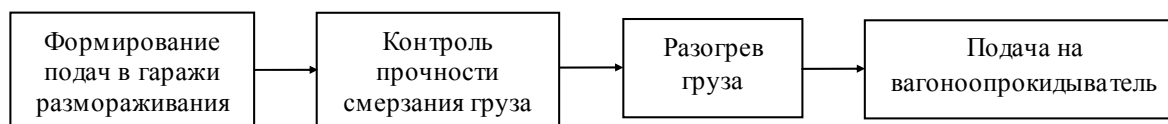


Рис. 2. Технологическая последовательность обработки вагонов внешнего парка в зимний период на этапе разогрева

Следовательно, смерзшее сырье может быть представлено материалом различной прочности, а продолжительность размораживания (t_p) может определяться прямым расчетом по величине показателя прочности (h_n) в соответствии с функциональной зависимостью

$$t_p = f(h_n). \quad (5)$$

Такая функциональная зависимость требует сбора и обработки большого объема статистических данных, которые были получены на основании комплексных экспериментальных исследований, проведенных на станции Рудная ММК им. Ильича в зимний период 2005–2006 гг.

Исследовались вагоны с железорудным концентратом и аглорудой, прибывшие от различных поставщиков, при температуре $-1...-20$ °С с различной продолжительностью транспортирования.

При проведении исследований величина (h_n) измерялась металлическим стержнем с масштабной разметкой (в сантиметрах) при движении вагонов. Необходимое число опытов определяется по известному методу [9].

Для определения числа опытов по расчету продолжительности разогрева железорудного концентрата было произведено 4 предварительных опыта, которые дали следующие результаты – при вхождении измерительного

стержня на 10 см в смерзшийся железорудный концентрат, вагоны размораживали 6, 7, 6, 6 часов соответственно. При этом $a_{cp} = 6,25$; $\sigma^2 = 0,25$; $\varepsilon = 0,13$.

Расчет необходимого количества опытов показал, что для обеспечения достоверности и обоснованности результатов необходимо произвести 26 опытов. Кроме того, было определено минимальное количество вагонов в каждом эксперименте, на которых необходимо проводить измерения глубины слоя смерзшегося груза и продолжительности разогрева.

Для установления количества вагонов задавались надежностью $H = 0,95$ и ошибкой Δ , взятой в долях стандарта σ : при ошибке $\pm 0,5\sigma$ необходимо 18 измерений. Перед подачей на

разогрев состав делится на 2–3 части, т. к. вместимость секции гаражей размораживания составляет 22 вагона. Поэтому в каждом эксперименте производили 22 измерения.

Для каждой группы вагонов вычисляли среднее значение величины слоя смерзшегося груза, что обеспечило достоверность результатов [8]. Результаты экспериментальных исследований по железорудному концентрату приведены в табл. 3.

Аналогично были произведено 4 предварительных опыта по аглоруде, которые дали следующие результаты: при вхождении измерительного стержня на 20 см в смерзшуюся аглоруду, вагоны размораживали 4, 4, 3, 5, 4 часов соответственно. При этом $a_{cp} = 3,87$; $\sigma^2 = 0,06$; $\varepsilon = 0,19$.

Таблица 3

Продолжительность разогрева в зависимости от глубины вхождения измерительного стержня в смерзшийся железорудный концентрат

№ группы вагонов	Температура окружающей среды, °С	Время в пути с учетом простоя в ПОП, ч	Глубина вхождения изм. стержня, см	Время разогрева, ч	№ группы вагонов	Температура окружающей среды, °С	Время в пути с учетом простоя в ПОП, ч	Глубина вхождения изм. стержня, см	Время разогрева, ч
1	-18	103,0	1,7	12	14	-4	28,95	8,0	5
2	-15	39,9	2,1	9	15	-5	35,40	19,0	2
3	-6	23,9	22,0	3	16	-1	29,50	23,0	2
4	-4	63,4	7,6	4	17	-2	28,50	47,0	1
5	-2	30,2	8,2	6	18	-5	31,95	40,0	2
6	-5	52,6	11,2	4	19	-4	29,4	25,0	4
7	-3	41,5	50,0	2	20	-4	42,9	35,0	4
8	-3	24,6	15,0	3	21	-16	26,9	9,0	6
9	-15	25,6	4,0	6	22	-12	36,6	3,0	7
10	-20	27,5	2,0	11	23	-20	26,3	1,0	21
11	-7	35,0	5,0	10	24	-5	29	7,8	6
12	-12	32,0	4,0	4	25	-3	26	45,0	1
13	-2	28,0	48,0	1	26	-5	30,1	43,0	2

Расчет необходимого количества опытов показал, что для обеспечения достоверности и обоснованности результатов необходимо произвести 17 опытов. Результаты экспериментальных исследований по аглоруде приведены в табл. 4.

Для установления функциональной зависимости $t_p = f(h_n)$ использован метод наименьших квадратов. По результатам математической обработки статистических данных функция $f(h_n)$ представлена в виде гиперболы, которая описывается следующей формулой (час.)

$$t_p = a/h_n + b, \quad (6)$$

где a – коэффициент, характеризующий род груза и температурный режим разогрева; b – коэффициент, характеризующий климатические условия.

Коэффициенты a и b определяются из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} b \cdot n + a_1 \sum_{j=1}^n \frac{1}{h_j} &= \sum_{j=1}^n t_j; \\ b \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{h_j} + a \sum_{j=1}^n \frac{1}{h_j^2} &= \sum_{j=1}^n \frac{t_j}{h_j}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решение системы уравнений относительно неизвестных коэффициентов a и b – позволили найти искомую гиперболу. Для определения

коэффициентов формулы (6) были рассчитаны параметры уравнений и решена система (7) относительно неизвестных a и b .

Таблица 4

Продолжительность разогрева в зависимости от глубины вхождения измерительного стержня в смерзшуюся аглоруду

№ группы вагонов	Температура окружающей среды, °С	Время в пути с учетом простоя в ПОП, ч	Глубина вхождения изм. стержня, см	Время разогрева, ч	№ группы вагонов	Температура окружающей среды, °С	Время в пути с учетом простоя в ПОП, ч	Глубина вхождения изм. стержня, см	Время разогрева, ч
1	-3	30,1	50,0	2,0	10	-4	23,2	60	2
2	-5	44,0	40,0	3,0	11	-4	30,3	40	3
3	-5	56,4	2,9	10,2	12	-16	26,5	12	4
4	-5	28,3	17,0	4,0	13	-15	27,3	7	6
5	-7	23,5	47,0	2,0	14	-12	28,3	35	4
6	-4	24,0	55,0	1,0	15	-20	22,5	30	5
7	-5	26,5	45,0	3,0	16	-5	27,5	12	8
8	-7	30,0	13,0	10,0	17	-3	22,0	60	1
9	-4	29,3	31,25	3,5	-	-	-	-	-

В итоге получены формулы для определения продолжительности разогрева в зависимости от глубины вхождения измерительного стержня в смерзшийся груз (для диапазона изменения $h_{п}$ 1...60 см):

- для железорудного концентрата

$$t_p = 18,11/h_{п} + 2,05, \quad (8)$$

- для аглоруды

$$t_p = 26,43/h_{п} + 2,59, \quad (9)$$

где $h_{п}$ – глубина вхождения измерительного стержня в смерзшийся груз, см.

Соответствующие им графики функциональной зависимости $t_p = f(h_{п})$ представлены на рис. 3. На основе теоретических и фактических значений найдено их корреляционное отношение:

– для железорудного концентрата $\eta=0,927$ (гарантийные границы $0,889 \leq \eta \leq 0,981$),

– для аглоруды $\eta=0,937$ (гарантийные границы $0,897 \leq \eta \leq 0,979$).

Полученные формулы позволяют рассчитывать продолжительность разогрева груза для климатических условий Приазовья.

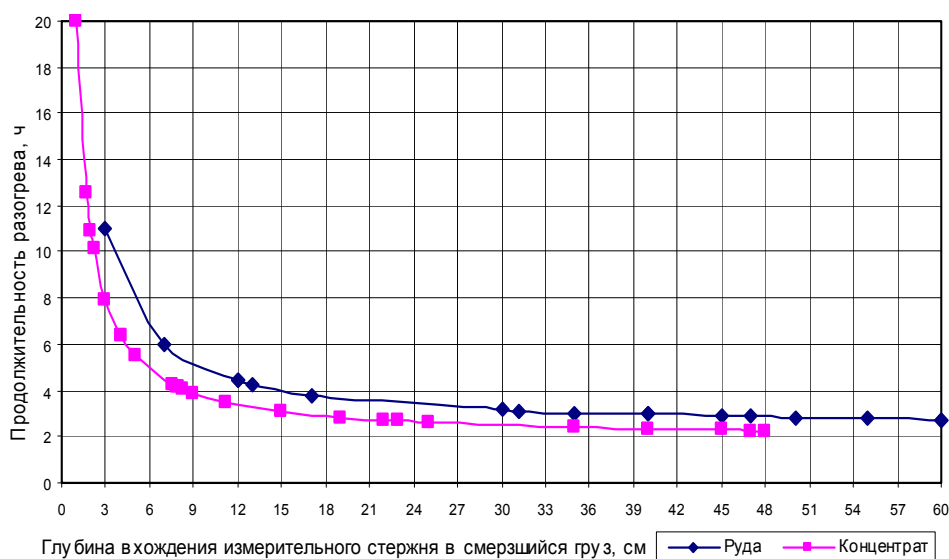


Рис. 3. Теоретические зависимости продолжительности разогрева от глубины вхождения измерительного стержня в смерзшийся груз

Контрольные проверки предложенных формул были проведены в январе 2006 года и показали сходимость на уровне 0,95, что подтверждает правомерность и целесообразность их практического использования. Наличие методики позволяет уточнить расчеты перерабатывающей способности гаражей размораживания.

Выводы

Проведенные исследования позволили разработать методику определения продолжительности разогрева груза в зависимости от глубины вхождения измерительного стержня в смерзшийся груз для конкретных условий Приазовья. Контрольная проверка показала достаточно высокую надежность ее применения.

Полученная методика рекомендуется для производственного использования и позволяет уточнить расчеты перерабатывающей способности гаражей размораживания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Парунакян В. Э. Исследование процесса обработки вагонопотока с сырьем грузовой станции металлургического завода в переходные периоды. // Вестник ПГТУ: Сб. науч. тр. – Мариуполь, 2001. – Вып. 11. – С. 353.
2. Парунакян В. Э. Совершенствование процесса приема и обработки вагонопотока с сырьем грузовой станции металлургического завода в зимний период / В. Э. Парунакян, В. Г. Дженчако // Вестник ПГТУ: Сб. науч. тр.– Мариуполь, 2003. – Вып. 13. – С. 355
3. Парунакян В. Э. Методика определения продолжительности разогрева грузов в конвективных гаражах размораживания // В.Э. Парунакян, В. Г. Дженчако // Вестник ПГТУ: Сб. науч. тр. – Мариуполь, 2004. – Вып. 14. – 367 с.
4. Виноградов В. К. Комбинированное воздействие на смерзшийся груз / В. К. Виноградов, Э. П. Северинова // Промышленный транспорт, – 1981. – № 2. – С. 9.
5. Михайлов Н. М. Комбинированный способ разогрева смерзшегося угля / Н. М. Михайлов, П. Я. Кузнецов // Промышленный транспорт. – 1980. – № 2. – С. 23–26.
6. Ялоха-Коха Х. Исследование способов размораживания и предупреждения смерзаемости сыпучих грузов в ПНР // Промышленный транспорт, – 1972. – № 9. – С. 14–15.
7. Наумов С. С. Углеразмораживающий гараж / С. С. Наумов, Г. Г. Наумов // Промышленный транспорт. – 1974. – № 2. – С. 12.
8. Веденяпин Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. – М.: Колос, 1983. – 196 с.
9. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1969. – 158 с.
10. Налимов В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
11. Ч. Хикс. Основные принципы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1967. – 217 с.

Поступила в редколлегию 22.05.2006.