

¹ Военный инновационный
технополис «ЭРА»,
г. Анапа

² Военная академия
материально-технического обеспечения
им. генерала армии А. В. Хрулёва,
г. Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассматриваются результаты исследований физических характеристик теплоаккумулирующих строительных материалов.

Современные тенденции в производстве и использовании материалов определяют необходимость разработки новых научно-методических аппаратов оценки физических характеристик энергосберегающих строительных материалов, которые позволят значительно улучшить свойства материалов, снизить их стоимость и повысить качество и надежность конструкций и изделий. В качестве такого аппарата авторами предлагается применение математической модели, статистическим описанием экспериментальных данных которой является линейная регрессия.

В качестве входных параметров системы выбраны исходные вещества для формирования микрокапсулированного теплоаккумулирующего материала, а выходными характеристиками являются зависимые переменные (удельная теплота фазового перехода, предел прочности на сжатие).

По результатам экспериментальных исследований и с помощью программы DataFit построены зависимости выходных параметров от доли составных компонентов материала. Проведена оценка адекватности математической модели F -критерием Фишера, значимость коэффициента множественной корреляции — по t -критерию Стьюдента. Определены составы материала с наилучшими физическими характеристиками.

Ключевые слова: теплоаккумулирующие материалы, микрокапсулы, математическая модель, физические характеристики, уравнение регрессии, критерий Фишера, критерий Стьюдента.

Введение. С каждым годом ужесточаются требования к энергосбережению [1]. Уменьшение потребления энергии и снижение выброса CO_2 является важным моментом политики передовых стран мира. Западные страны в разных отраслях экономики активно ведут исследования по изучению вопроса энергосберегающих технологий. В России детальность сконцентрирована на оптимизации стоимости строительства в виде капитальных затрат [2]. При этом расходы на эксплуатацию зданий и сооружений не подвергались детальному анализу из-за низкой стоимости топлива и централизованного отопления объектов инфраструктуры. Вопросы безопасности и экономии материалов для строительства являются важными при проектировании зданий и сооружений.

Согласно Распоряжению Правительства РФ № 1715-р от 13.11.2009 г. «Об утверждении Энергетической стратегии России на период до 2030 года», за период реализации Стратегии планируется снижение зависимости российской экономики

от энергетического сектора за счет опережающего развития инновационных малоэнергоёмких секторов экономики и реализации технологического потенциала энергосбережения [3–6]. Достижение долгосрочных целей возможно за счет использования имеющегося в стране потенциала возобновляемых источников энергии и научно-технических разработок в этой сфере.

В зависимости от субъекта Российской Федерации разрабатываются отдельные нормы и правила строительства в области энергосбережения с учетом потенциала местной сырьевой базы [7–9].

Широкое применение имеют ограждающие конструкции с высокой тепловой эффективностью. В начале 80-х на основе анализа и оценки тепловой эффективности слоистых стеновых конструкций установлена зависимость суммарного расхода тепла от показателя сопротивления теплопередаче конструкции [10–12]. Достигнуть снижение суммарного расхода тепла возможно за счет увеличения толщины наружного ограждения, что позволит

увеличить сопротивление теплопередаче ограждения. Основываясь на практических результатах эксплуатации известных ограждающих конструкций, определено, что, вследствие недостаточной эффективности теплоизоляции, дефектов конструктивных решений, часто происходит повышенный расход тепла на отопление. Поэтому многие страны интенсивно развивают промышленное производство теплоизоляционных и теплоаккумулирующих материалов. Анализ рынка таких стран, как Швеция, Финляндия, Германия, США и другие, показал, что выпускаемые теплоизоляционные материалы имеют больший объем на душу населения, чем в России, в 5–7 раз. Также определено, что основные затраты при эксплуатации приходятся на отопление помещений. А при плохой изоляции большая часть тепловой энергии расходуется на «отопление» наружного воздуха, а не помещения. В результате исследований [13] выявлено, что устройство качественной теплоизоляции позволит сэкономить до 50 % энергии, которая расходуется на отопление.

Действующие строительные нормы показывают, что требуемое сопротивление теплопередаче увеличилось в 3–3,5 раза. А значит, существует необходимость создания эффективного теплоаккумулирующего материала с улучшенными техническими, эксплуатационными, экономическими и экологическими характеристиками. Широкое применение получили конструкции с применением теплоаккумулирующих материалов, обеспечивающих более высокие теплозащитные свойства сооружений. Однако существующие материалы имеют недостаточную стабильность, цикличность и неравномерность распределения по территории, чтобы обеспечить требуемую теплозащиту зданий и сооружений.

В связи с этим существует потребность в разработке новых научно-методических подходов по оценке физических характеристик энергосберегающих строительных материалов. Так, с помощью теории моделирования возможно рассмотрение процесса функционирования реальной системы на основе задаваемых расчетных параметров. Математическое моделирование позволит изучить физические характеристики строительных материалов и определить уровень значимости расчетных и экспериментальных данных.

Теоретическая часть. На этапе изучения и формирования сложных систем необходима оценка количественных и качественных зависимостей процессов, происходящих в этих системах, исследования структуры и параметров [14, 15].

На основе теории моделирования систем [16] математическое описание объекта исследований осуществляется в системе «Теплоаккумулирующий материал с микрокапсулами», которая включает параметры, описывающие процесс функционирования реальной системы. Обобщенные операторы преобразуют набор независимых внутренних параметров системы, которые представлены векторами воздействия переменных параметров во внешние выходные параметры.

В качестве входных воздействий определены: гипс $G(x_1)$, вода $V(x_2)$ и микрокапсулы $M(x_3)$. Микрокапсулы представляют собой гранулы, материалом ядра которых является парафин, а оболочка — кремнийорганическое соединение. Переменными параметрами являются технологические v , которые оказывают влияние на формирование теплоаккумулирующего материала с микрокапсулами и включают: температура $T(v_1)$, давление $P(v_2)$ и время $t(v_3)$.



Рис. 1. Модель формирования теплоаккумулирующего материала с микрокапсулами

Модель формирования теплоаккумулирующего материала с микрокапсулами представлена на рис. 1.

Основными выходными характеристиками системы выбраны: удельная теплота $\lambda_{\text{ф}}^{\text{уд}}$ (y_1) и предел прочности на сжатие $R_{\text{сж}}$ (y_2). Для статистического описания процесса выбрана линейная регрессия:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{u=1}^k b_u x_u + \sum_{u \neq j}^k b_{uj} x_u x_j + \sum_{u \neq j = q}^k b_{ujq} x_u x_j x_q + \dots + b_{u_1 \dots u_k} x_{u_1} x_{u_2} \dots x_{u_k}, \quad (1)$$

где x — вектор объясняющих переменных;

b_0 — свободный член;

b_u, b_{uj}, b_{ujq} — коэффициенты, которые учитывают линейное влияние на отклик взаимодействия факторов первого, второго и т.д. порядков;

j — номер наблюдения;

k — общее количество наблюдений.

На основе скалярного произведения y на x_j , в зависимости от числа опытов N , определяют коэффициент уравнения регрессии b_j :

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i. \quad (2)$$

F -критерием Фишера проверяют значимость функции отклика y по формуле:

$$F^{\Phi} = \frac{\bar{S}_y^2}{\bar{S}_{\text{ост}}^2}, \quad (3)$$

где $\bar{S}_{\text{ост}}^2$ — остаточная дисперсия;

\bar{S}_y^2 — общая дисперсия.

Общая дисперсия рассчитывается по формуле:

$$\bar{S}_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n - 1}, \quad (4)$$

где y_i — значения параметра оптимизации в i -м опыте;

n — число измерений.

Степень свободы $f = n - 1$ определяет число независимых сравнений или число независимых измерений.

$\bar{S}_{\text{ост}}^2$ — остаточная дисперсия рассчитывается по формуле:

$$\bar{S}_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n - p - 1}, \quad (5)$$

где y_i — значения параметра оптимизации в i -м опыте;

\hat{y}_i — значение регрессии в i -ом опыте;

n — число повторных опытов;

p — число коэффициентов регрессии исследуемой модели.

С помощью F -критерия Фишера определяют, во сколько раз уравнение регрессии предсказывает результаты опытов лучше, чем среднее значение $y = \bar{y}$. Среднеарифметическое значение переменной определяют по формуле:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_{i0}}{N}, \quad (6)$$

где N — количество опытов;

y_{i0} — опытное значение переменной.

В случае, если $F^{\text{ф}}$ достигает или превышает значение $F^{\text{табл}}$ при выбранном уровне значимости, считается, что уравнение предсказывает результаты эксперимента лучше среднего.

Далее определяют коэффициент множественной корреляции R с целью изучения взаимосвязи функции отклика y и переменными x_i :

$$R = \sqrt{1 - \frac{\bar{S}_{\text{ост}}^2}{\bar{S}_y^2}}. \quad (7)$$

С помощью t -критерия Стьюдента определяют значимость коэффициента множественной корреляции:

$$t_R = \frac{R}{\bar{S}_R} \geq t_{(n-p-1)}^{\text{табл}}, \quad (8)$$

где \bar{S}_R — среднеквадратическая погрешность коэффициента множественной корреляции:

$$\bar{S}_R = \frac{(1 - R^2)}{\sqrt{n - p - 1}}. \quad (9)$$

Также в качестве выходных характеристик можно рассмотреть количество теплоты, удельную теплоемкость и коэффициент теплопроводности.

Количество теплоты Q , которое получает или отдает система в процессе теплообмена, определяют по формуле:

$$Q = \lambda_{\text{ф}}^{\text{я}} \cdot m \text{ кДж}, \quad (10)$$

где $\lambda_{\text{ф}}^{\text{я}}$ — удельная теплота плавления/кристаллизации, Дж/кг;

m — масса материала, кг.

Массу материала m рассчитывают через удельный вес в зависимости от доли вещества в гипсовой штукатурке (0 %, 10 %, 50 %).

Коэффициент теплопроводности определяют в соответствии с формулой:

$$\lambda = \frac{Q_p \cdot \delta}{(T_1 - T_2) S \cdot t}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}, \quad (11)$$

где Q_p — количество теплоты, Дж;

δ — толщина материала, м;

T_1, T_2 — температура с двух сторон материала (T_1 — внутренняя, T_2 — внешняя), °C;

S — площадь материала/объекта, м²;

t — время, час.

Удельная теплоемкость материала рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{Q_p}{m_p \cdot \Delta T}, \text{ Дж/кг} \cdot \text{°C}, \quad (12)$$

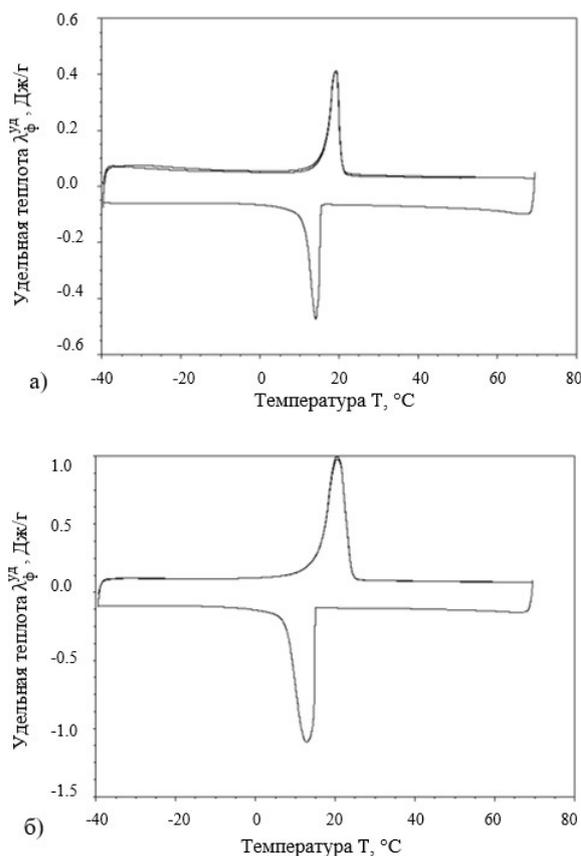


Рис. 2. Термоаналитическая кривая строительного материала:
а) при 10 % содержании микрокапсул в общем объеме материала;
б) при 50 % содержании микрокапсул в общем объеме материала

где Q_p — количество теплоты, кДж;

m_p — масса материала, кг;

ΔT — разность конечной и начальной температуры материала, °C.

Экспериментальная часть. Важными методами исследования свойств веществ являются термоаналитические [17, 18], основанные на регистрации параметров исследуемой системы в условиях программированного воздействия температуры. В работе выбран метод дифференциальной сканирующей калориметрии [19].

Измерения проводились на образцах гипса с микрокапсулами с помощью дифференциального сканирующего калориметра DSQ-Q100. Полученные зависимости удельной теплоты от температуры с учетом процентного содержания микрокапсул в общем объеме материала представлены на рис. 2.

Регрессионная модель объекта с учетом натуральных обозначений факторов имеет вид:

$$\lambda_{\text{ф}}^{\text{я}} = 71,02 - 4,2G + 5,65M + 0,67GM. \quad (13)$$

Полученное соотношение показывает взаимосвязь удельной теплоты фазового перехода $\lambda_{\text{ф}}^{\text{я}}$ с такими факторами, как содержание микрокапсул в теплоаккумулирующем материале (ТАМ) «М» и содержание гипса в ТАМ «G» микрокапсулы. На параметр оптимизации перечисленные факторы влияют пропорционально, на что указывают линейные эффекты. Наибольшее влияние оказывает доля микрокапсул, наименьшее влияние оказывают парные взаимодействия.

Далее рассчитывается дисперсия коэффициентов регрессии:

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2\{y\}}{nN} = \frac{0,56}{3 \cdot 9} = 0,02.$$

Среднее квадратическое отклонение с учетом каждого коэффициента регрессии:

$$S\{b_i\} = \sqrt{S^2\{b_i\}} = \sqrt{0,02} = 0,14.$$

Значимость коэффициента регрессии проверяется по соотношению $|b_i| = t_{\text{табл}} \cdot S\{b_i\}$. На основании таблицы t -распределения Стьюдента выбирается показатель $t_{\text{табл}}$ с учетом уровня значимости $\alpha=0,05$ и числа степеней свободы f_y . В связи с равномерным дублированием величина f_y определяется по формуле:

$$f_y = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 16;$$

$$t_{\text{табл}} = 2,12;$$

$$t_{\text{табл}} \cdot S\{b_i\} = 2,12 \cdot 0,14 = 0,3.$$

Условие незначимости коэффициентов регрессии:

$$|b_i| = t_{\text{табл}} \cdot S\{b_i\};$$

$$\beta_1 = |-4,2| > 0,3;$$

$$\beta_2 = |5,65| > 0,3;$$

$$\beta_{12} = |0,67| > 0,3.$$

Поскольку в результате проведенных расчетов выявлено, что все коэффициенты являются значимыми, то уравнение регрессии остается неизменным.

Рассчитывается доверительный интервал для каждого из значимых коэффициентов как

$$b_i - t_{\text{табл}} S\{b_i\} \leq \beta_i \leq b_i + t_{\text{табл}} S\{b_i\};$$

$$3,9 \leq \beta_1 \leq 4,5;$$

$$5,35 \leq \beta_2 \leq 5,95;$$

$$0,37 \leq \beta_3 \leq 0,97.$$

Адекватность математической модели проверяется F -критерием Фишера по формулам (3)-(5):

$$F = \frac{S_y^2}{S_{\text{ост}}^2} = \frac{87,9}{16,75} = 5,25.$$

На основе табличного значения F -распределения для $\alpha=0,05$ и числа степеней свободы $f_{y1} = n - 1 = 8$ (числитель), $f_{y2} = n - 1 = 9 - (2 + 1) = 6$ (знаменатель), $F_{\text{табл}} = 4,15$. Т.о. $F_{\text{расч}} (5,25) > F_{\text{табл}} (4,15)$, определено, что уравнение регрессии адекватно. Чем больше значение $F_{\text{расч}}$ превышает $F_{\text{табл}}$, тем эффективнее уравнение регрессии.

Коэффициент множественной корреляции R :

$$R = \sqrt{1 - \frac{\bar{S}_{\text{ост}}^2}{\bar{S}_y^2}} = 0,9.$$

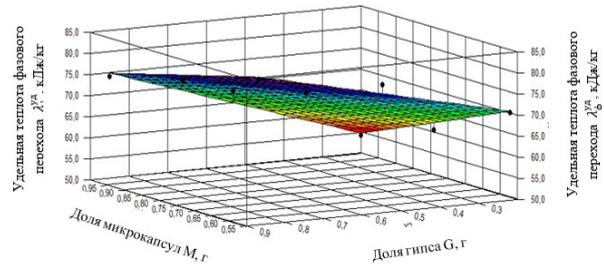


Рис. 3. Зависимость удельной теплоты фазового перехода λ_{ϕ}^{yA} от доли микрокапсул M и доли гипса G

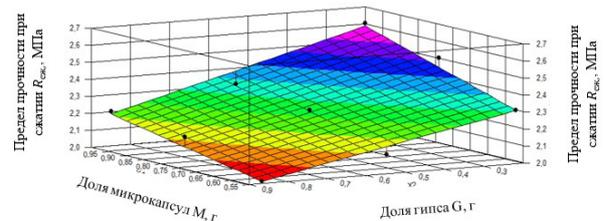


Рис. 4. Зависимость предела прочности на сжатие $R_{сж}$ от доли микрокапсул M и доли гипса G

Значимость коэффициента множественной корреляции проверяется по t -критерию Стьюдента:

$$t_R = \frac{R}{\bar{S}_R} \geq t_{(n-p-1)}^{\text{табл}}$$

$$t_R = \frac{0,9}{0,095} = 9,47 \geq 2,12.$$

Определено, что условие выполняется, следовательно, существует тесная взаимосвязь между результативным показателем и набором факторных показателей. Прогнозируемые показатели определены с точностью 90 % [20, 21].

По результатам экспериментальных исследований и с помощью программы DataFit построены зависимости выходных параметров от доли микрокапсул и гипса, которые представлены на рис. 3 и рис. 4.

По полученным графикам видно, что максимальные значения теплоты $\lambda_{\phi}^{yA} = 83,69$ кДж/кг при достаточной прочности при сжатии $R_{сж} = 2$ МПа достигнуто при сочетании микрокапсул в количестве 0,85 г, гипса — 0,57 г.

На рис. 5 приведено сопоставление экспериментальных с расчетными данными, полученными с использованием зависимости (13) для удельной теплоты фазового перехода.

Согласно проведенным расчетам, вероятность точности измерения достаточно высокая и равна 90 %.

В подтверждение полученных результатов были рассчитаны и другие физические характеристики, такие как:

— количество теплоты, получаемое или отдаваемое системой при теплообмене Q , рассчитывается по формуле (10);

— коэффициент теплопроводности λ — по формуле (11);

— удельная теплоемкость c — по формуле (12).

По результатам расчета количества теплоты Q_p , которое будет содержаться в материале, определено, что создаваемая гипсовая штукатурка с 50 %

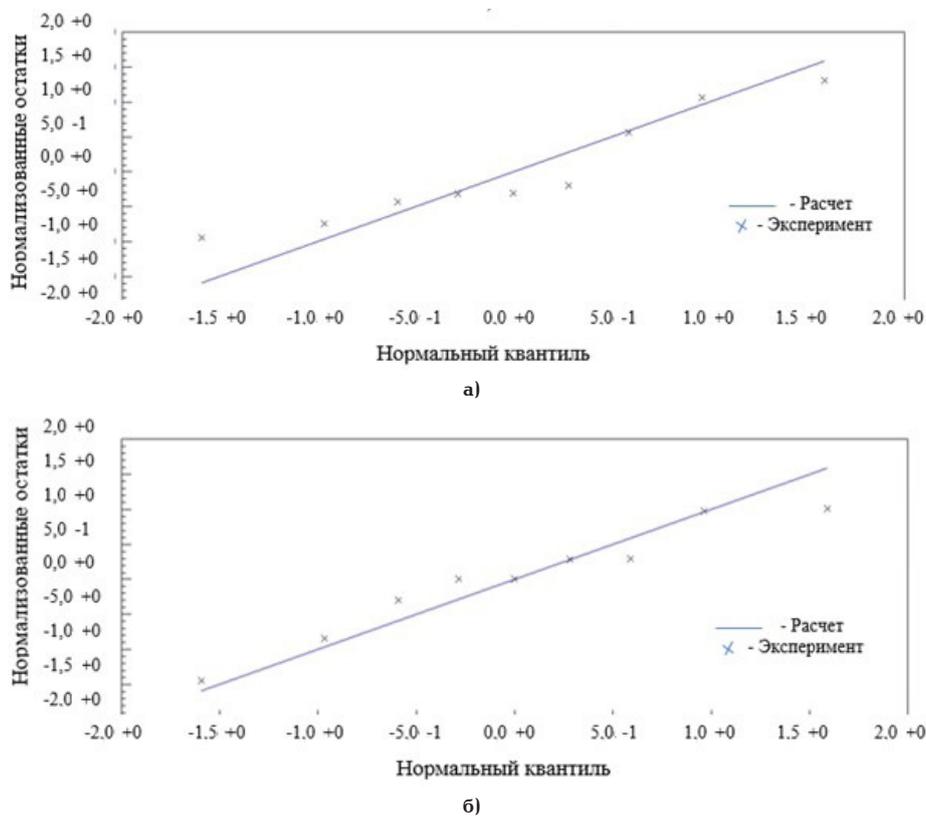


Рис. 5. График сравнения экспериментальных данных с результатами аппроксимации при $R_2 = 0,9$: а) для удельной теплоты; б) для прочности при сжатии

содержанием синтезированных микрокапсул способна передать тепла почти в четыре раза больше по сравнению с обычной гипсовой штукатуркой без добавления микрокапсул.

По коэффициенту теплопроводности видно, что с увеличением доли микрокапсул показатель увеличивается. Чем больше значение коэффициента теплопроводности материала, тем лучше он проводит тепло.

Относительно показателя удельной теплоемкости определено, что наилучшими являются составы гипсовой штукатурки с содержанием синтезированных микрокапсул 50 %. Чем больше удельная теплоемкость вещества, тем больше тепла необходимо затратить на его нагрев, но тем больше тепла это вещество отдает в окружающее пространство при своем охлаждении.

Заключение. Таким образом, разработанная сложная многофакторная система позволяет определить зависимость характеристик ТАМ от содержания входных переменных. С учетом нормативных требований [22] определено, что при 80 % содержании микрокапсул в ТАМ материал разрушается. Поэтому можно сделать вывод о том, что при выбранном сочетании компонентов (50 % микрокапсул от общей доли материала) достигается максимальный показатель удельной теплоты $\lambda_{\text{ф}}^{\text{н}} = 83,69$ кДж/кг и при этом механическая прочность соответствует требованиям $R_{\text{сж}} = 2$ МПа.

Библиографический список

1. Бодров В. И., Шевченко А. А., Ионычев Е. Г. Модель энергосберегающего производственного сельскохозяйственного здания // Известия вузов. Строительство. 2005. № 9. С. 114–116.

2. Матросов Ю. А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути её решения. Москва: НИИСФ, 2008. 496 с.

3. Мальцев А. В. Энергосберегающие ограждающие конструкции с использованием местных материалов при варьируемых параметрах теплопереноса: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2014. 169 с.

4. Об утверждении Энергетической стратегии России на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstva-rf-ot-13112009-n-1715-r/> (дата обращения: 12.02.2023).

5. СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Введ. 1017–07–01. Москва: Минрегион России, 2012. 96 с.

6. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. Москва: Госстрой России, ФГУП, ЦПП, 2004. 25 с.

7. Матросов Ю. А. Сравнительный анализ территориальных норм России по энергоэффективности жилых зданий и нового постановления Германии // Энергосбережение. 2002. № 4. С. 60–63.

8. СП 23–101-2000. Проектирование тепловой защиты зданий. Москва: Госстрой России, 2001. 95 с.

9. Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодоэлектроснабжению. МГСН 2.01.-99. Москва, 1999. 78 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/5fd/4294850043.pdf> (дата обращения: 10.02.2023).

10. Альшуллер Е. Н. О показателе удельной энергоёмкости в индустриальном домостроении // Бетон и железобетон. 1982. № 8. С. 27–28.

12. Альшуллер Е. Н. Эффективность применения слоистых стен в монолитном домостроении // Бетон и железобетон. 1993. № 2. С. 27–28.

13. Ушков Ф. В., Цаплев Н. Н. Энергоёмкость и тепловая эффективность наружных стен // Жилищное строительство. 1981. № 4. С. 11–12.

14. Шкарин А. В. Сухие теплоизоляционные смеси на композиционных вяжущих: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2013. 26 с.
15. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. Москва: Наука, 1988. 400 с.
16. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / пер. с англ. Ю. А. Данилова; под ред. [и с предисл.] Ю. Л. Климонтовича. Москва: Мир, 1985. 419 с.
17. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Высшая школа, 2001. 343 с.
18. Шестак Я. Теория термического анализа. Москва: Мир, 1978. 528 с.
19. Майорова А. Ф. Термоаналитические методы исследования // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 10. С. 50–54.
20. Хеммингер В., Хене Г. Калориметрия. Теория и практика / пер. с англ. О. Б. Саламатиной. Москва: Химия, 1989. 90 с.
21. Яковлева Ю. С. Результаты экспериментальных исследований энергоэффективного строительного материала для объектов военной инфраструктуры // Актуальные проблемы естественных и технических наук: сб. материалов I Междунар. науч.-практ. конф., 25 июня 2021 г. Санкт-Петербург, 2021. С. 295–302.
22. Яковлева Ю. С. Современная технология получения строительного теплоаккумулирующего материала // Тенденции развития строительства объектов гражданского и специального назначения: сб. науч. тр. по материалам II Всерос. науч.-методич. конф. 20–22 апреля 2022 г. Тюмень: Изд-во ТВВИКУ, 2022. С. 215–218.
23. ГОСТ Р 58279-2018. Смеси сухие строительные штукатурные на гипсовом вяжущем. Технические условия. Введ. 2019–07–01. Москва: Стандартинформ, 2019. 16 с.

ЯКОВЛЕВА Юлия Сергеевна, научный сотрудник научно-исследовательского отдела экспериментальных исследований и испытаний Военного инновационного технополиса «ЭРА», г. Анапа.

SPIN-код: 3474-0490

AuthorID (РИНЦ): 657954

Адрес для переписки: usa.17@yandex.ru

БИРЮКОВ Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой технологии, организации и экономики строительства Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 6465-0627

AuthorID (РИНЦ): 804789

Адрес для переписки: aleks_bir@mail.ru

Для цитирования

Яковлева Ю. С., Бирюков А. Н. Моделирование физических характеристик теплоаккумулирующих строительных материалов // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 97–104. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-97-104.

Статья поступила в редакцию 06.03.2023 г.

© Ю. С. Яковлева, А. Н. Бирюков

¹Military Innovative Technopolis «ERA»,
Anapa, Russia

²Military Academy
of Logistics named after General
of Army A. V. Khrulev,
Saint Petersburg, Russia

MODELING OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF HEAT-ACCUMULATING BUILDING MATERIALS

The article discusses the results of studies of the physical characteristics of heat-accumulating building materials.

Modern trends in the production and use of materials determine the need to develop new scientific and methodological devices for assessing the physical characteristics of energy-saving building materials, which will significantly improve the properties of materials, reduce their cost and improve the quality and reliability of structures and products. As such a device, the authors propose the use of a mathematical model, the statistical description of experimental data of which is linear regression. The initial substances for the formation of a microcapsulated heat-accumulating material are selected as input parameters of the system, and the output characteristics are dependent variables (specific heat of the phase transition, compressive strength). Based on the results of experimental studies and using the DataFit program.

Keywords: heat storage materials, microcapsules, mathematical model, physical characteristics, regression equation, Fisher criterion, Student criterion.

References

1. Bodrov V. I., Shevchenko A. A., Ionychev E. G. Model' energosberegayushchego proizvodstvennogo sel'skokhozyaystvennogo zdaniya [Model of an energy-efficient production agricultural building] // *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo. Izvestia of Higher Education Institutions. Construction*. 2005. No. 9. P. 114–116. (In Russ.).
2. Matrosov Yu. A. Energoberezheniye v zdaniyakh. Problema i puti ee resheniya [Energy saving in buildings. The problem and how to solve it]. Moscow, 2008. 496 p. (In Russ.).
3. Mal'tsev A. V. Energoberegayushchiye ograzhdayushchiye konstruktsii s ispol'zovaniyem mestnykh materialov pri var'iruyemykh parametrah teplomassoperenosa [Energy-saving building envelopes using local materials with varying heat and mass transfer parameters]. Penza, 2014. 169 p. (In Russ.).
4. Ob utverzhdenii Energeticheskoy strategii Rossii na period do 2030 goda: rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 13 noyabrya 2009 g. № 1715-r. [On Approval of Russia's Energy Strategy to 2030: Russian Government Order No. 1715-r of 13 November 2009]. URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-pravitelstv-rf-ot-13112009-n-1715-r/> (accessed: 12.02.2023). (In Russ.).
5. SP 50.13330.2012. Svod pravil. Teplovaya zashchita zdaniy [SP 50.13330.2012. The course of rules. Thermal performance of the buildings]. Moscow, 2012. 96 p. (In Russ.).
6. SNiP 23-02-2003. Teplovaya zashchita zdaniy [SNiP 23-02-2003. Thermal performance of the buildings]. Moscow, 2004. 25 p. (In Russ.).
7. Matrosov Yu. A. Sravnitel'nyy analiz territorial'nykh norm Rossii po energoeffektivnosti zhilykh zdaniy i novogo postanovleniya Germanii [Comparative analysis of Russian

territorial standards for energy efficiency in residential buildings and the new German regulation] // *Energoberezheniye. Energy Efficiency*. 2002. No. 4. P. 60–63. (In Russ.).

8. SP 23–101-2000. Proyektirovaniye teplovoy zashchity zdaniy [SP 50.13330.2012. Thermal performance design of buildings]. Moscow, 2001. 95 p. (In Russ.).

9. Energoberezheniye v zdaniyakh. Normativy po teplozashchite i teplovodoelektrosnabzheniyu. MGSN 2.01.-99 [Energy-efficient in buildings. Standards for thermal protection and thermo-electricity. MGSN 2.01.-99.]. Moscow, 1999. 78 p. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/5fd/4294850043.pdf> (accessed: 10.02.2023). (In Russ.).

10. Al'tshuller E. N. O pokazatele udel'noy energoemkosti v industrial'nom domostroyenii [On the indicator of specific energy intensity in industrial house building] // *Beton i zhelezobeton. Concrete and Reinforced Concrete*. 1982. No. 8. P. 27–28. (In Russ.).

11. Al'tshuller E. N. Effektivnost' primeneniya sloistykh sten v monolitnom domostroyenii Effectiveness of the use of laminated walls in monolithic construction // *Beton i zhelezobeton. Concrete and Reinforced Concrete*. 1993. No. 2. P. 27–28. (In Russ.).

12. Ushkov F. V., Tsaplev N. N. Energoyemkost' i teplovaya effektivnost' naruzhnykh sten [Energy intensity and thermal efficiency of exterior walls] // *Zhilishchnoye stroitel'stvo. Housing Construction*. 1981. No. 4. P. 11–12. (In Russ.).

13. Shkarin A. V. Sukhiye teploizolyatsionnyye smesi na kompozitsionnykh vyazhushchikh [Dry heat insulating mixtures based on composite binders]. Belgorod, 2013. 26 p. (In Russ.).

14. Buslenko N. P. Modelirovaniye slozhnykh sistem [Modelling of complex systems]. Moscow, 1988. 400 p. (In Russ.).

15. Haken H. Sinergetika. Ierarkhiya neustoychivostey v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh [Advanced Synergetics] / trans. from Engl. Yu. A. Danilova; ed. by Yu. L. Klimontovich. Moscow, 1985. 419 p. (In Russ.).

16. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. Modelirovaniye system [Systems Modeling]. 3rd ed. Moscow, 2001. 343 p. (In Russ.).

17. Shestak Ya. Teoriya termicheskogo analiza [Theory of thermal analysis]. Moscow, 1978. 528 p. (In Russ.).

18. Mayorova A. F. Termoanaliticheskiye metody issledovaniya [Thermoanalytical research methods] // Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal. *Soros Education Journal*. 1998. No. 10. P. 50–54. (In Russ.).

19. Hemminger W., Hohne G. Kalorimetriya. Teoriya i praktika [Calorimetry: Fundamentals and practice] / ed. by O. B. Salamatinoy. Moscow, 1989. 90 p. (In Russ.).

20. Yakovleva Yu. S. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy energoeffektivnogo stroitel'nogo materiala dlya ob'yektov voyennoy infrastruktury [Experimental results on an energy-efficient building material for military infrastructure] // Aktual'nyye problemy yestestvennykh i tekhnicheskikh nauk. *Current Issues in Natural and Technical Sciences*. St. Petersburg, 2021. P. 295–302. (In Russ.).

21. Yakovleva Yu. S. Sovremennaya tekhnologiya polucheniya stroitel'nogo teploakkumuliruyushchego materiala [State-of-the-art technology for building heat storage material] // Tendentsii razvitiya stroitel'stva ob'yektov grazhdanskogo i spetsial'nogo naznacheniya. *Trends in Civil and Special Construction Projects*. Tyumen, 2022. P. 215–218. (In Russ.).

22. GOST P 58279-2018. Smesi sukhiye stroitel'nyye shtukaturnyye na gipsovom vyazhushchem. Tekhnicheskiye

usloviya [Dry building levelling plaster mixes based on gypsum binder. Specifications]. Moscow, 2019. 16 p. (In Russ.).

YAKOVLEVA Yuliya Sergeevna, Researcher of Research Department of Experimental Research and Testing, Military Innovative Technopolis «ERA», Anapa.

SPIN-code: 3474-0490

AuthorID (RSCI): 657954

Correspondence address: usa.17@yandex.ru

BIRYUKOV Aleksandr Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Technology, Organization and Economics of Construction Department, Military Institute (Engineering and Technical) Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulev, Saint Petersburg.

SPIN-code: 6465-0627

AuthorID (RSCI): 804789

Correspondence address: aleks_bir@mail.ru

For citations

Yakovleva Yu. S., Biryukov A. N. Modeling of physical characteristics of heat-accumulating building materials // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 97–104. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-97-104.

Received March 06, 2023.

© Yu. S. Yakovleva, A. N. Biryukov