

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 691.553.4

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

© 2023 г. Ю. С. Яковлева^{1,*}, А. Н. Бирюков², Р. Р. Коков¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

²Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения
им. генерала армии А.В. Хрулева, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: era_1@mil.ru

Поступила в редакцию 06.07.2023 г.

После доработки 06.07.2023 г.

Принята к публикации 05.10.2023 г.

Рассмотрен вопрос технического состояния объектов военной инфраструктуры. Обоснована изношенность зданий и сооружений, в связи с которой существует необходимость в принятии решений по применению инновационных и эффективных строительных материалов для строительства и реконструкции военно-строительных комплексов и других объектов военной инфраструктуры. Предложен теплоаккумулирующий материал, способный за счет изменения фазового состояния поддерживать комфортную температуру в помещении, что позволяет снизить затраты на эксплуатационное содержание энергоемких систем инженерного оборудования.

DOI: 10.56304/S2782375X23020158

ВВЕДЕНИЕ

Преобразование Вооруженных Сил Российской Федерации в результате реформирования армии неразрывно связано с масштабными объемами строительства объектов военной инфраструктуры и требует значительных финансовых ресурсов [1]. Финансирование жилья, денежного содержания и оснащения войск современным вооружением и военной техникой не подложит корректировке.

В структуре годовых эксплуатационных расходов наиболее значительными являются текущие затраты на эксплуатационное содержание энергоемких систем инженерного оборудования, а именно: отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха (до 45%), электросилового оборудования и электроосвещения (до 38%). А в структуре затрат на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха 70–80% затрат приходится на долю топливно-энергетических ресурсов, в частности теплоты, холода, электроэнергии.

Большинство объектов военной инфраструктуры и военных городков проектировалось и строилось в 50–80-х гг. прошлого века по уже устаревшим нормам, теплозащита зданий не соответствует современным требованиям, что влечет в отопительный период значительные тепловые потери на отопление. В связи с этим возросла необходимость в капитальном и текущем ремонтах объектов Министерства обороны Российской Федерации. Значительная часть конструктивных

элементов и технических систем зданий и сооружений в настоящее время имеет износ более 60%. Такой показатель свидетельствует об их плохом техническом состоянии. Лимитов, выделяемых на капитальный и текущий ремонты объектов Министерства обороны Российской Федерации, для устранения износа, связанного с недофинансированием эксплуатации зданий и сооружений в 90-е гг. XX века, было недостаточно. Основные технико-экономические показатели строительных объектов предопределяются проектными решениями и характеризуют их качество в течение продолжительного эксплуатационного периода.

Анализ динамики степени износа [2] зданий Министерства обороны Российской Федерации показал, что большинство объектов военной инфраструктуры имеет ограниченно-распространенное использование, а некоторые объекты находятся в аварийно-техническом состоянии, а значит, нуждаются в капитальном ремонте.

Комплексное обеспечение качества строительства объектов военной инфраструктуры, ресурсосбережение при эксплуатации объектов, а также другие задачи, связанные с технической эксплуатацией и реконструкцией зданий и сооружений, являются неотъемлемой частью жилищно-коммунального комплекса. Что касается энергосбережения, то суть энергетических интересов заключается в рациональном использовании имеющихся энергоресурсов и получаемых за



Рис. 1. Диаграмма распределения строительных материалов по объему применения для внутренней отделки стен объектов военной инфраструктуры.

их счет всех видов энергии, а также в производстве, сохранении и накоплении энергетического потенциала и энергоресурсов высокого качества, в том числе за счет альтернативных источников получения энергии.

Поскольку объекты военной инфраструктуры имеют высокую степень изношенности, существует необходимость в принятии решений по применению инновационных и эффективных строительных материалов для строительства и реконструкции военно-строительных комплексов и других объектов военной инфраструктуры.

Для этого были изучены строительные материалы, применяемые для внутренней отделки помещения. В качестве исходных данных приняты усредненные сведения из локальных смет на общестроительные работы объектов военной инфраструктуры Министерства обороны Российской Федерации, а также наиболее значимого теплофизического показателя — теплопроводности.

Для наглядности определения часто используемого материала для внутренней отделки стен объектов военной инфраструктуры сформирована диаграмма, представленная на рис. 1.

Таким образом, среди построек до 1995 г. существует малое количество построек, которые удовлетворяют современным требованиям по теплоизоляции [3, 4]. Прежде всего это касается жилых домов первых массовых серий постройки 60–70-х гг., так называемых “хрущевок”, которых насчитывается ~250 млн м² общей площади жилья по Российской Федерации. Аналогичными домами застроены, в том числе, военные городки в более поздний период. Поскольку теплоизоляция применялась в строительстве не повсеместно и для поддержания комфортного температурного режима в здании для работы и проживания людей

возводились объекты и сооружения с толстыми стенами и массивными перекрытиями, основание здания проектировалось с учетом громадных напряжений и с использованием больших затрат стройматериалов. При строительстве железобетонных конструкций выявлено, что здания и сооружения имеют низкую энергоэффективность, плохо отводят водяные пары, формируют внутри неблагоприятный микроклимат.

Анализ научных исследований позволяет сделать вывод о недостатках, связанных с осуществлением процесса теплоснабжения удаленных потребителей и решением задач аккумулирования посредством фазового перехода. Однако существующие строительные материалы имеют недостаточную стабильность, цикличность и неравномерность распределения по территории, чтобы обеспечить требуемую теплозащиту зданий и сооружений. В связи с этим существует необходимость в создании новых эффективных теплоаккумулирующих материалов с высокими теплоизоляционными характеристиками, имеющими требуемые теплофизические и эксплуатационные свойства объектов военной инфраструктуры.

Одним из перспективных способов аккумулирования энергии является тепловое аккумулирование с использованием скрытой теплоты фазового перехода “твердое тело—жидкость” неорганических, органических соединений. Несмотря на столь важное прикладное значение тепловых аккумуляторов фазового перехода, многие проблемы в области их разработки остаются нерешенными. В последнее время все возрастающий интерес вызывает проблема применения и поиска для аккумулирования энергии эффективных фазопереходных теплоаккумулирующих материалов на основе многокомпонентных систем.

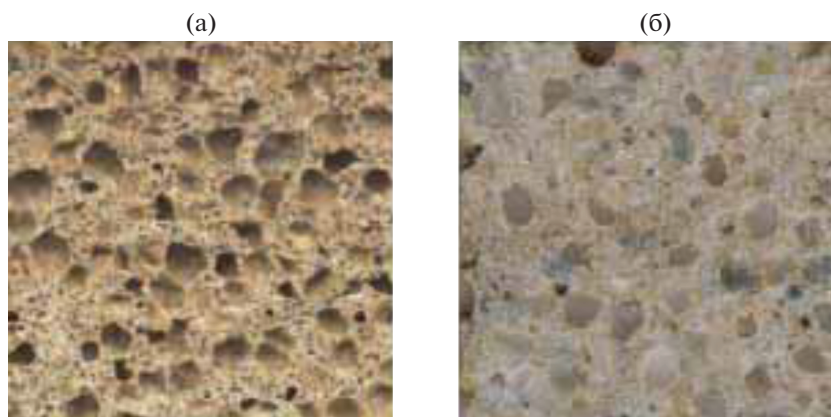


Рис. 2. Включение теплоаккумулирующего материала (парафина) в стеновую панель: а — материал панели без теплоаккумулирующего материала, б — поры материала заполнены теплоаккумулирующим материалом.

Решением проблемы энергосбережения в объектах военной инфраструктуры является строительный материал, обладающий способностью накапливать и отдавать тепло в помещение за счет происходящих теплофизических процессов. Он представляет собой теплоаккумулирующий строительный материал с микрокапсулами с латентным теплонакопителем, в которых аккумулярование тепла происходит посредством использования теплоты фазового перехода вещества из твердого состояния в жидкое. Достоинствами таких материалов являются высокая теплоемкость, постоянство температуры и низкое давление. Применение материалов с фазовым переходом в изделиях для стен и перекрытий позволит обеспечить дополнительную теплоизоляцию и регулирование климатических условий в различных объектах военной инфраструктуры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Одним из популярных вариантов применения фазоменяющих материалов являются стеновые панели. Как правило, это смесь бетона с парафином или с включенными в него капсулами, содержащими фазоменяющие материалы (рис. 2).

Панели с фазоменяющим материалом используются в качестве ограждающих конструкций здания и поглощают излишнее тепло в дневное время, отдавая его в ночное, когда отсутствует поступление солнечной энергии [5–7]. Эффективность их использования также связана с тем, что в них сочетаются свойства тепловой защиты, термостабилизатора и собственно аккумуляторов теплоты. При этом конструкция системы аккумулярования оказывается предельно простой.

Отметим, что имеется обширная область применения фазоменяющих материалов, связанная с разработкой средств теплозащиты и термостаби-

лизации. Это объясняется тем, что фазоменяющие материалы, обладая хорошими теплоаккумулирующими свойствами, способны поддерживать температуру в заданном узком диапазоне. По принципу работы такое устройство не отличается от аккумуляторов с фазовым переходом. Различие состоит в целях и требованиях, предъявляемых к теплоаккумулирующим материалам. Например, если для теплозащиты используется слой фазоменяющего материала, то низкий коэффициент теплопроводности играет положительную роль, тогда как в аккумуляторах с фазовым переходом — наоборот. Цели при создании аккумуляторов с фазовым переходом и устройств теплозащиты и термостабилизации являются противоположными — в первом случае энергия аккумулируется для дальнейшего использования, во втором — для сброса в окружающую среду при наступлении более благоприятных условий.

Для расчета и конструирования аккумуляторов с фазовым переходом необходимо знать особенности поведения систем, в которых осуществляется фазовый переход из твердой фазы в жидкую и обратно. Такие процессы описываются задачами стефановского типа [5–7]. Основной их особенностью является наличие поверхности фазового перехода, разделяющей жидкую и твердую фазу (рис. 3).

В зависимости от того, переходит твердая фаза в жидкую или наоборот, процесс протекает с поглощением или выделением тепла. Эта теплота называется скрытой теплотой фазового перехода. Она затрачивается на разрушение кристаллической решетки при плавлении и выделяется при кристаллизации. Удельная теплота фазового перехода для данного вещества является величиной постоянной.

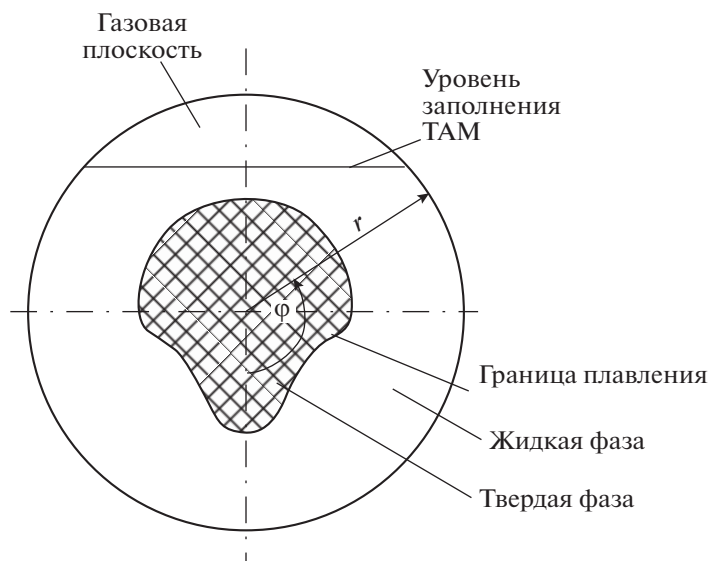


Рис. 3. Схема плавления теплоаккумулирующего материала в емкости (капсуле): r — радиус емкости (капсулы), ϕ — коэффициент, учитывающий стесненность потока.

На основе теплового баланса для поверхности раздела фаз может быть выведено условие Стефана [8, 9]:

$$\rho_{\text{тв}} Q_p \times \partial S_n / \partial \tau = \lambda_{\text{ж}} \partial T / \partial n|_{n \rightarrow +0} - \lambda_{\text{тв}} \partial T / \partial n|_{n \rightarrow -0}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{тв}}$ — плотность вещества в твердом состоянии, кг/м³; Q_p — количество теплоты при постоянном давлении, Дж/кг; S_n — перемещение границы раздела фаз в направлении нормали, м²; τ — время, с; $\lambda_{\text{ж}}$ — коэффициент теплопроводности материала в жидком состоянии, Вт/(м · °С); T — температура фазового перехода, К; n — показатель

преломления; $\lambda_{\text{тв}}$ — коэффициент теплопроводности материала в твердом состоянии, Вт/(м · °С).

Соотношение (1) позволяет рассчитывать перемещение границы фазового перехода по температурным полям в жидкой и твердой фазах. В то же время само перемещение межфазной поверхности влияет на температурные поля. Поэтому такие задачи включают в себя уравнения теплообмена в фазах, условия на внешних границах и поверхности раздела фаз. Кроме условия (1) в подавляющем большинстве задач стефановского типа используется условие постоянства температуры на межфазной границе ($p = \text{const}$):

$$T = T_{\phi} = \text{const}. \quad (2)$$

В смесях и ряде органических веществ фазовый переход протекает в фиксированном для данного вещества интервале температур. В этом случае вместо условия Стефана (1) и соотношения (2) используется температурная зависимость удельной теплоемкости, которая в области фазового перехода имеет один или несколько пиков (рис. 4):

$$c = c(T). \quad (3)$$

Условие (3) нужно использовать при расчете процессов теплообмена в органических веществах — алифатических углеводородах, восках, а также в смесях, например парафинах.

Соотношения (1)–(3) относятся к области фазового перехода, которая при выполнении условия (2) представляет собой поверхность, а при условии (3) — слой. При использовании условия (3) задача решается как однофазная.

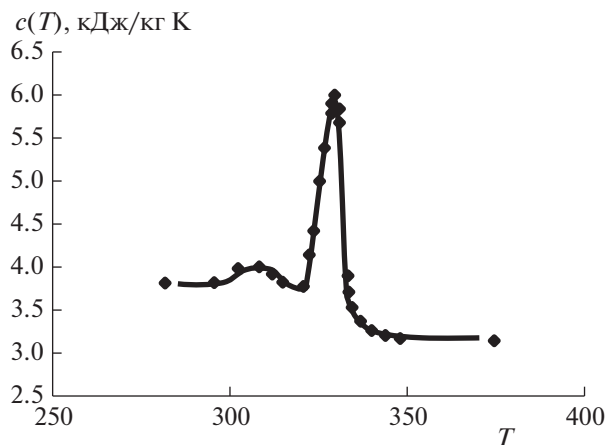


Рис. 4. Кривая теплоемкости парафина: $c(T)$ — температурная зависимость удельной теплоемкости, кДж/кг · К, T — температура, К.

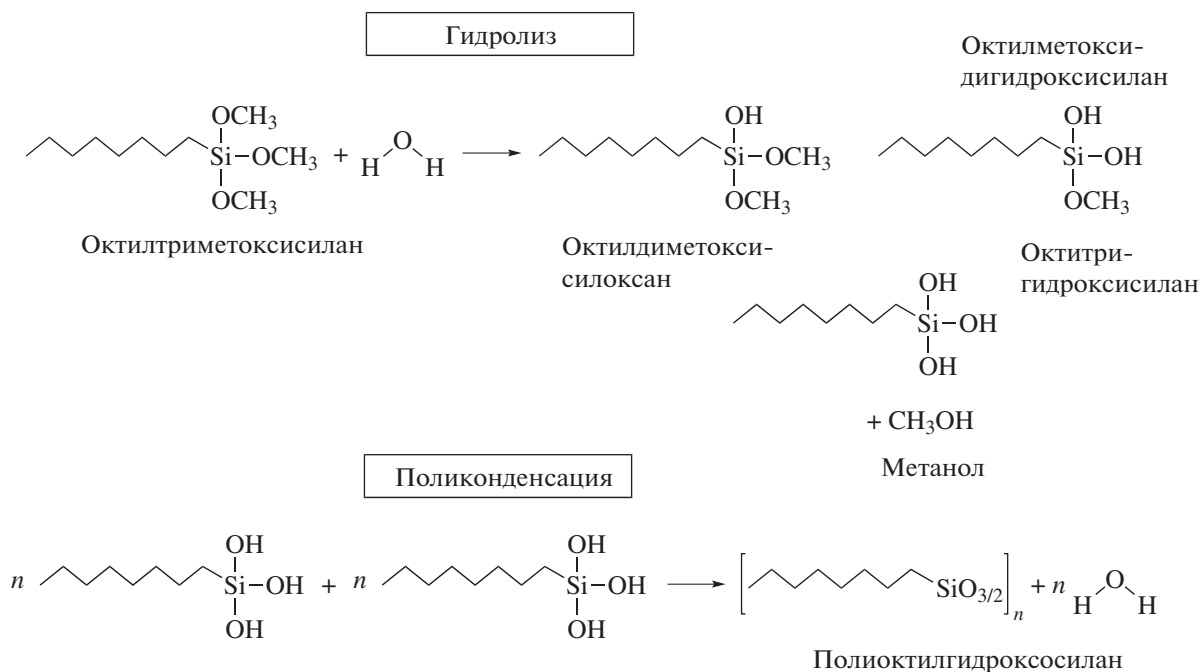


Рис. 5. Процесс синтеза микрокапсулированного фазоменяющего материала.

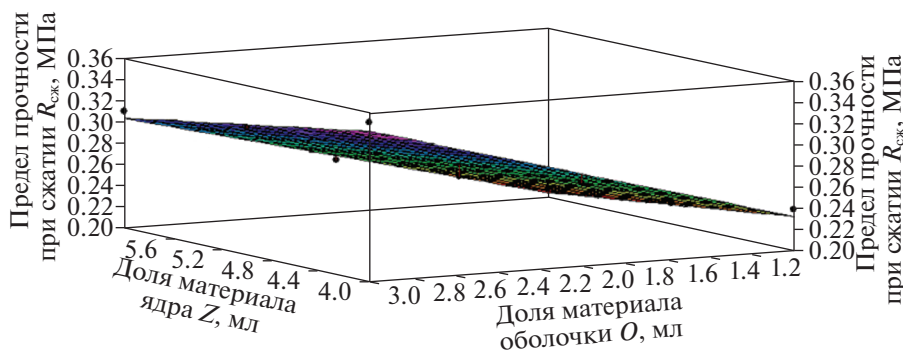
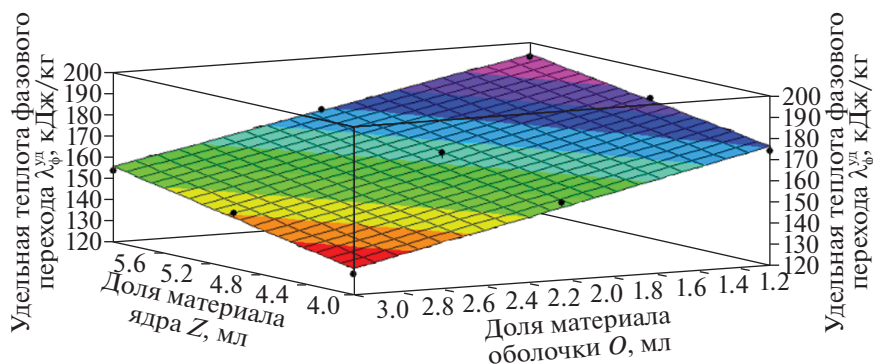
Рис. 6. Зависимость удельной теплоты фазового перехода $\lambda_{\text{ф}}^{\text{уд}}$ от доли материала ядра Z и доли материала оболочки O.Рис. 7. Зависимость предела прочности при сжатии $R_{\text{сж}}$ от доли материала ядра Z и доли материала оболочки O.

Таблица 1. Матрица расчета физических показателей микрокапсулированного теплоаккумулирующего материала

Опыт	Материал ядра	Материал оболочки	Материал ядра и материал оболочки	Удельная теплота фазового перехода $\lambda_{\text{ф}}^{\text{уд}}$, кДж/кг	Расчетное значение предела прочности при сжатии $R_{\text{сж}}$, МПа
1	–174.07	–174.1	174.07	174.07	0.24
2	193.09	–193.1	–193.1	193.09	0.21
3	–129.74	129.74	–129.7	129.74	0.35
4	153.62	153.62	153.62	153.62	0.29
5	0	–186.2	0	186.16	0.22
6	0	146.02	0	146.02	0.31
7	–156.42	0	0	156.42	0.31
8	175.18	0	0	175.18	0.26
9	0	0	0	167.38	0.28
Σ	61.66	–123.9	4.86	1481.68	2.47

Использование парафина возможно в качестве материала, который помещается с помощью химической реакции, например, в оболочку (рис. 5). При этом материал оболочки должен удерживать парафин при его фазовых превращениях, происходящих от воздействия температуры окружающей среды. В качестве материала оболочки предлагается применение кремнийорганического соединения [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований физических показателей (удельной теплоты фазового перехода и предела прочности при сжатии) предлагаемого микрокапсулированного теплоаккумулирующего материала представлены в табл. 1.

Зависимости физических показателей микрокапсул от доли материала ядра и доли материала оболочки представлены на рис. 6, 7.

По результатам экспериментальных исследований выявлено, что повышенное содержание материала ядра “Z” в капсуле позволяет увеличить показатель удельной теплоты $\lambda_{\text{ф}}^{\text{уд}}$ до 193.09 кДж/кг. Однако при этом понижается показатель прочности при сжатии $R_{\text{сж}}$ до 0.21 МПа. Что касается материала оболочки “O”, то при повышении ее доли в капсуле улучшается показатель прочности при сжатии $R_{\text{сж}}$ до 0.35 МПа, но снижается показатель удельной теплоты $\lambda_{\text{ф}}^{\text{уд}}$ до 129.74 кДж/кг, который показывает, какое количество теплоты необходимо для превращения вещества из одного фазового

состояния в другое при плавлении или кристаллизации. Согласно результатам изучения литературных источников предел прочности при сжатии микрокапсул должен быть равен 0.25–0.35 МПа [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование существующего опыта и наработок ученых в области теплоаккумулирования показало, что применение в строительстве ресурсосберегающих изделий и материалов в комплексе с эффективными теплоаккумулирующими материалами для ограждающих конструкций позволит существенно снизить материалоемкость и энергоемкость строительных объектов и повысить эффективность строительной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков А.Н., Яковлева Ю.С. Теплоаккумулирующий материал для строящихся и эксплуатируемых объектов военной инфраструктуры: монография. СПб.: КСИ-Принт, 2022. 307 с.
2. Шахрамьян М.А., Нигметов Г.М., Гайфуллин З.Г., Бабусенко М.С. Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений. М.: МЧС России, 2003. 11 с.
3. Соломатин А.В. // Организационные и научно-технические проблемы совершенствования и реформирования Капитального строительства Министерства Обороны Российской Федерации: сб. докл. науч.-практ. конф. М. 1996. Кн. 1. С. 8.

4. Яковлева Ю.С., Макаренко Н.Г., Маричев П.А. // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению “Технологии энергообеспечения”: сб. науч. труд. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. 25 ноября 2019 г. Минобороны России. ВИТ “ЭРА”. Анапа. 2019. С. 85.
5. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 1985. 480 с.
6. Рубинштейн Л.И. Проблема Стефана. Рига: Звайзгне, 1970. 232 с.
7. Россихин Н.А. Лекции о задаче Стефана.
8. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии. [пер. с англ.]. М.: Мир, 1987. 272 с.
9. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. 521 с.
10. Яковлева Ю.С., Бирюков А.Н. Патент № 2778725 Российская Федерация, МПК G05B 19/18 (2006.01). СПК G05B 19/18 (2022.05). Система автоматизации технологического процесса изготовления энергоэффективного теплоаккумулирующего строительного материала. № 2021130567. заявл. 19.10.2021. опубл. 23.08.2022 / 20 с. ил.
11. Elberfeld D. Verkapselung von Latentwärmespeichern in einer Siloxanhülle. Oldenburg. 2001. 114 p.