

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.044

DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190



Оригинальная статья /Original article

**К вопросу о формировании свойств реставрационных составов на основе
воздушных гидравлических вяжущих веществ**

П.Д. Батаева¹, З.З. Аларханова¹, Х.М. Батаева¹, А.Д. Батаев²

¹Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова РАН,

¹364051, г. Грозный, В. Алиева (Старопромысловское) шоссе, 21А, Россия,

²Грозненский государственный нефтяной технический университет,

²364051, г. Грозный, пр. им. Х.А. Исаева, 100, Россия

Резюме. Цель. В настоящем исследовании выполнен обзор органических добавок, органических и неорганических вяжущих веществ, включая воздушные и гидравлические известковые вяжущие вещества. Рассмотрен тепломассообмен в процессах декарбонизации и карбонизации воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и ремонтно-реставрационных составов на их основе, знание которого необходимо для проектирования оборудования и технологических процессов производства минеральных вяжущих веществ, а также технологий и составов для ремонтно-реставрационных работ. **Метод.** Реакции диссоциации и декарбонизации приведены как обратимые реакции, рассчитаны: фронт разложения, границы разложения известняка, время диссоциации и скорость реакции диссоциации. Для получения полной информации массообмена при декарбонизации известняка принят во внимание и теплообмен, что усложняет задачу в связи с неизотермичностью температурного поля, которая сказывается на различии скоростей реакции декарбонизации. **Результат.** Приведено решение задачи, выполненное Гельдом и Ивановым, и дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье. Рассмотрены типы твердения извести: карбонатное, гидратное и гидросиликатное. Карбонатное твердение извести представлено как процесс затвердевания, длительный по времени. Выявлена зависимость интенсивности карбонизации от содержания воды и влажности. **Вывод.** Установлена научная и практическая ценность нового научного направления: «Исследование воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и разработка ремонтно-реставрационных составов на их основе». Разработаны новые составы для ремонта, восстановления и реставрации памятников истории и культуры, отвечающие предъявляемым ремонтно-реставрационным требованиям.

Ключевые слова: тепломассообмен, диссоциация, карбонизация, декарбонизация, минеральное вяжущее, воздушная и гидравлическая известь, негашеная известь, меласса, ремонтно-реставрационный состав, известняк, гидроксид кальция, углекислый газ

Для цитирования: П.Д. Батаева, З.З. Аларханова, Х.М. Батаева, А.Д. Батаев. Тепломассообмен в процессах декарбонизации и карбонизации воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и ремонтно-реставрационных составов на их основе. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):179-190. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190

**On the issue of forming the properties of restoration compositions based on air
and hydraulic binders**

P.D. Bataeva¹, Z.Z. Alarhanova¹, Kh. M. Bataeva¹, A.D. Bataev²

¹Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences,

¹21A V. Aliyeva (Staropromyslovskoe) highway, Grozny 364051, Russia,

²Grozny State Oil Technical University named after M.D. Millionshikov,

²100 Kh.A. Isaev Ave., Grozny 364051, Russia

Abstract. Objective. This study provides a review of organic additives, organic and inorganic binders, including air and hydraulic lime binders. Heat and mass transfer in the processes of decarbonization and carbonization of air and hydraulic lime binders and repair and restoration compositions based on them is considered, knowledge of which is necessary for the design of equipment and technological processes for the production of mineral binders, as well as technologies and compositions for repair and restoration work. **Method.** The dissociation and decarbonization reactions are given as reversible reactions, the decomposition front, the boundaries of limestone decomposition, the dissociation time and the dissociation reaction rate are calculated. To obtain complete information on mass transfer during the decarbonization of limestone, heat transfer is also taken into account, which complicates the task due to the non-isothermal temperature field, which affects the difference in the rates of the decarbonization reaction. **Result.** The solution of the problem, carried out by Held and Ivanov, and the Fourier differential equation of thermal conductivity are given. The types of lime hardening are considered: carbonate, hydrate and hydrosilicate. Carbonate hardening of lime is presented as a hardening process that takes a long time. The mechanism of carbonate hardening has been studied. The dependence of carbonization intensity on water content and humidity was revealed. **Conclusion.** The scientific and practical value of a new scientific direction has been established: “Research of air and hydraulic lime binders and the development of repair and restoration compositions based on them.” As a result of the research, new compositions have been developed for the repair, restoration and restoration of historical and cultural monuments that meet the repair and restoration requirements.

Key words: heat and mass transfer, dissociation, carbonization, decarbonization, mineral binder, air lime, hydraulic lime, quicklime, molasses, repair and restoration composition, limestone, calcium hydroxide, carbon dioxide

For citation: P.D. Bataeva, Z.Z. Alarkhanova, Kh.M. Bataeva, A.D. Bataev. On the issue of forming the properties of restoration compositions based on air and hydraulic binders. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):179-190. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190

Введение. На Юге России сосредоточено значительное количество объектов культурного наследия (ОКН), требующие ремонта, восстановления и реставрации. Для производства ремонтно-восстановительных и реставрационных работ необходимы специальные ремонтно-реставрационные составы, отвечающие специфическим реставрационным требованиям. В основе этих составов в основном лежат органические вяжущие вещества и неорганические вяжущие вещества, включая воздушные и гидравлические известковые вяжущие вещества.

Постановка задачи. Для оптимизации технологии производства ремонтно-реставрационных работ необходимо изучение тепломассообмена в процессах декарбонизации и карбонизации воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и ремонтно-реставрационных составов на их основе.

Методы исследования. Информационную базу научного исследования составили данные поисковых исследований вяжущих веществ и материалов. Методологическую основу исследования составляют методы физико-химического анализа, системные методы и систематизация теоретического и практического материала. В работе использованы современные методы физико-механических испытаний материалов и конструкций, включающие разрушающие и неразрушающие методы контроля качества, а также современный математический аппарат обобщения и обработки экспериментальных и статистических данных.

Обсуждение результатов. Существует множество разнообразных вяжущих веществ, однако при ремонте и восстановлении объектов культурного наследия (ОКН) применяется лишь часть из них. Такие вяжущие вещества относят к ремонтно-

реставрационным. А они, в свою очередь, подразделяются на минеральные вяжущие вещества и органические вяжущие вещества [3-7]. Минеральные (неорганические) вяжущие вещества – это порошковидные материалы, затвердевающие и образующие камень при смешивании с водой или растворами некоторых солей. Некоторые минеральные вяжущие твердеют образованием гидратных новообразований при затворении вяжущего вещества водой, а некоторые твердеют вследствие взаимодействия с углекислотой воздуха и одновременной перекристаллизации гидрата окиси кальция [4].

Неорганические вяжущие используются в основном в смеси с водой и наполнителями и заполнителями, которые представляют собой органические и неорганические материалы разных размеров: отдельные зерна, куски, волокна и др. В некоторых случаях неорганические вяжущие используют в чистом виде без наполнителей и заполнителей. Каждая из этих групп обладает специфическими свойствами: органические материалы не выдерживают высоких температур, минеральные, наоборот не горят, но плохо работают на растяжение. Неорганические вяжущие вещества в зависимости от их основных свойств подразделяются на три основные группы: воздушные, гидравлические и кислотостойкие (рис. 1).

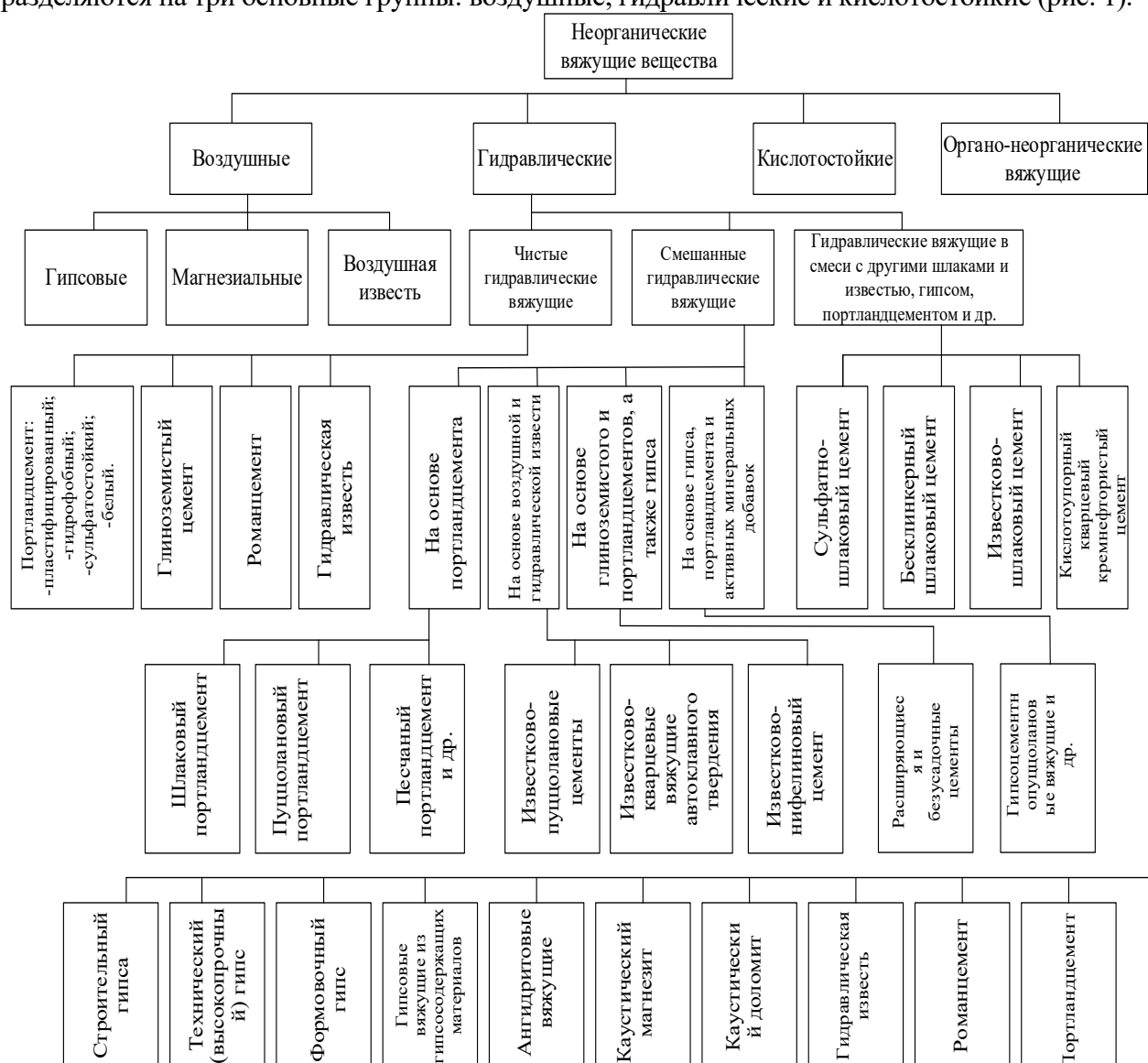


Рис. 1. Классификация неорганических вяжущих веществ
 Fig. 1. Classification of inorganic binders

Воздушные вяжущие вещества при затворении водой твердеют и сохраняют прочность лишь в воздушной среде и могут быть использованы в качестве компонентов

в составе для ремонта и реставрации памятников архитектуры, истории и культуры с учетом обстоятельства, что при систематическом увлажнении бетоны, изделия и конструкции на воздушных вяжущих теряют прочность и разрушаются. К ним относятся гипсовые вяжущие, строительная воздушная известь, магнезиальные вяжущие и прочие [5].

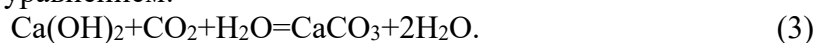
Рассмотрим строительную воздушную известь. Воздушная известь (CaO) – вяжущее вещество, получаемое обжигом при температуре 700-1100°C кальциево-магниевого карбонатных горных пород, содержащих не более 6-8 % глинистых и песчаных примесей и который состоит в большей части из оксида кальция. В результате обжига из известняка улетучивается углекислый газ, а он составляет до 44% его массы, из-за чего объем продукта уменьшается на 10%. Реакцию обжига можно записать в следующем виде:



Гашение извести происходит по реакции:



Твердение извести может происходить только в воздушно-сухих условиях и может быть представлено следующим уравнением:



Гидравлические вяжущие вещества после гидратации и предварительного твердения на воздухе способны твердеть в последующем в воздушной и водной средах, поэтому их используют в производстве разнообразных изделий, конструкций и полуфабрикатов, предназначенных к эксплуатации как в воздушной, так и в водной средах [6].

Из гидравлических вяжущих веществ для ремонтных нужд приемлемы только гидравлические извести, а остальные современные вяжущие не удовлетворяют требованиям к реставрационным составам. Такие вяжущие более сложные по своему составу. Они состоят из нескольких соединений:



Из группы гидравлических для ремонтно-реставрационных нужд могут быть использованы смешанные вяжущие, получаемые смешением чистых вяжущих друг с другом, а также с активными органическими и неорганическими добавками.

Эти вяжущие выделены в отдельную группу: органо-неорганические вяжущие вещества (рис. 1), которые удовлетворяют предъявляемым требованиям и могут быть использованы в качестве вяжущих компонентов при проектировании ремонтных составов. В эту группу можно отнести вяжущие на основе воздушной и гидравлической извести, строительного и технического гипса, ангидрита, известково-пуццоланового, известково-кварцевого и известково-нефелинового вяжущих [7].

Чистые гидравлические вяжущие, не содержащие или содержащие не более 10-15% добавок, не удовлетворяют ремонтным и реставрационным требованиям, за исключением белого цемента и гидравлической извести. По своему составу белый цемент схож с гидравлической известью, поэтому в порядке исключения может быть использован для приготовления ремонтного состава [5].

Необходимо дополнительно исследовать гидравлические вяжущие вещества, получаемые смешением активных и неактивных зол и им подобных компонентов с активаторами твердения: гидратной известью, гидравлической известью, гипсом, ангидритовым вяжущим, каустическим магнезитом, каустическим доломитом и др., на предмет их пригодности для ремонтно-реставрационных нужд [6].

В вяжущие вещества, а также в ремонтные бетоны и растворы, в определенных условиях, вводят различные добавки, которые представлены на рис. 2.

Из множества добавок в вяжущие вещества, бетоны и растворы для ремонтно-реставрационных нужд приемлемы только органические (казеиновые) добавки, такие как молоко, творог, простокваша и др.

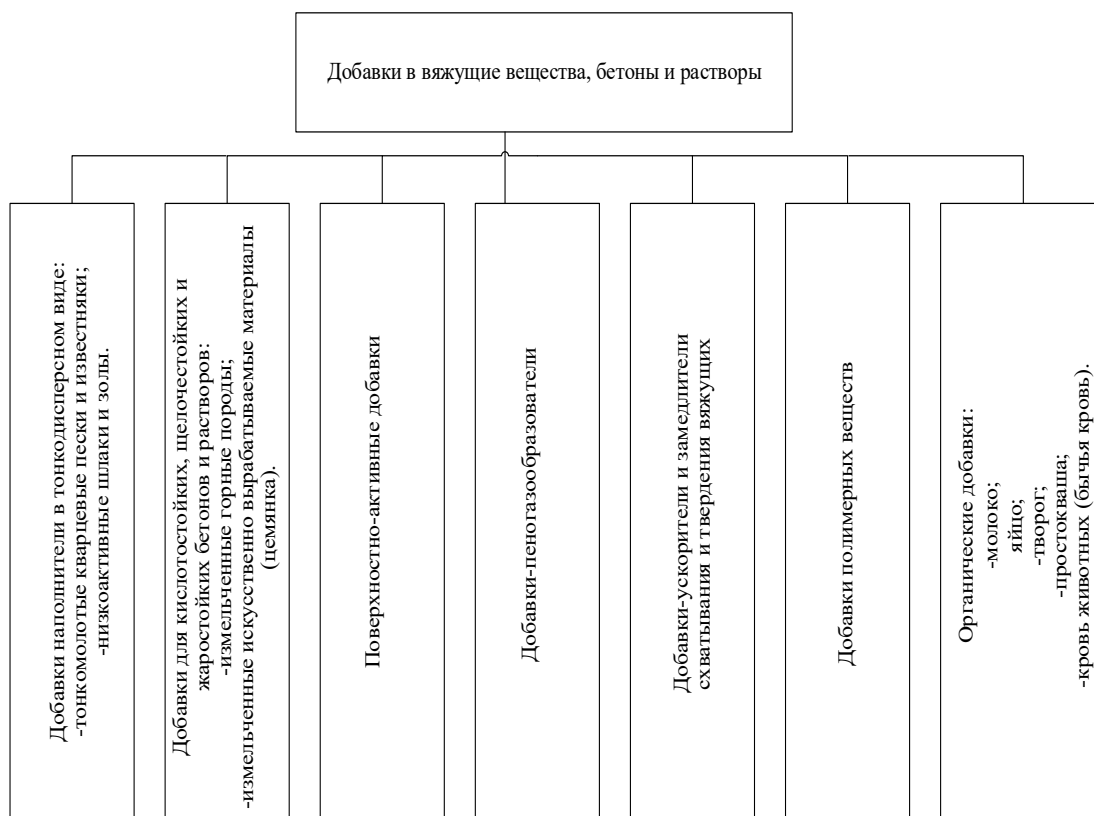


Рис. 2. Классификация добавок в вяжущие вещества, бетоны и растворы

Fig. 2. Classification of additives in binders, concretes and solutions

Обжиг известняка является основной технологической операцией, при которой происходит полное разложение CaCO_3 и $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ на CaO , MgO с выделением углекислого газа CO_2 [5, 8, 10]. Реакция диссоциации и декарбонизации CaCO_3 имеет следующий вид:



Реакция диссоциации CaCO_3 обратимая реакция. При решении прикладной задачи – обжиг известняка, возникает потребность оценки развития явления декарбонизации: фронта разложения, границы разложения CaO - CaCO_3 , времени диссоциации и др.

По истечении некоторого промежутка времени Δt в обжигаемом известняке формируются две зоны: наружная зона CaO ; внутренняя зона CaCO_3 . При возникновении зоны CaO происходит диффузия углекислого газа CO_2 через этот слой до тех пор, пока не произойдет диссоциация CaCO_3 . Скорость реакции диссоциации CaCO_3 (v) равна скорости образования CO_2 (v_1) и диффузии CO_2 (v_2) через зону CO_2 [10], т.е.:

$$v = v_1 = v_2$$

Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= k \cdot S (1 - P/p_0) = k_1 (4\pi r^2/p_0)(p_0 - P) \\ v_2 &= -4\pi r^2 D \cdot dp/dr \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $k = k_0 \exp[-E/(RT)]$ - константа скорости прямой реакции;

$S = 4\pi r^2$ - поверхность фронта реакции;

p_0 - упругость декарбонизации CaCO_3 при заданной температуре t ;

P - давление CO_2 на поверхность фронта реакции;

D - коэффициент диффузии углекислого газа (CO_2) через зону оксида кальция (CaO);

r - переменный радиус ядра CaCO_3 .

В результате получаем:

$$P - p = \frac{v_2}{4\pi D} (R^{-1} - r^{-1}), \quad (7)$$

Выразив из (6) p и подставив его в (5) для v_1 , после небольших преобразований получим

$$v_1 = 4\pi r^2 R k_1 (p_0 - P) / [p_0 D R + r k_1 (R - r)], \quad (8)$$

Выражение (8) определяет соотношение характеристик процесса, при которых обеспечивается установившийся режим декарбонизации CaCO_3 .

Скорость реакции (6)

$$dr/d\tau \quad (9)$$

связана с массой известняка G и временем τ .

Для этого необходимо учесть, что

$$v = (dG/d\tau) = 84\pi r^2 d_r/d\tau, \quad (10)$$

Из (10) следует

$$dr/d\tau = v / (4\pi r^2 \delta), \quad (11)$$

С учетом (8)

$$dr/d\tau = R \cdot k_1 \cdot D (p_0 - P) / [p_0 D R \delta + r k_1 \delta (R - r)]. \quad (12)$$

Разделив переменные и проинтегрировав (12) в пределах $R-r$ и $0 - \tau$, получаем зависимость для определения положения фронта реакции от времени (τ):

$$\tau = \delta \cdot [R^3 - r^3 / (3DR) - R^2 - r^2 / (2D) - (p_0/k_1) (R - r)] (p_0 - P)^{-1}, \quad (13)$$

Время полной декарбонизации CaCO_3 определяется исчезновением неразложившегося ядра ($r=0$). Необходимо отметить, что с ростом размеров исходных кусков, сближение P и p_0 замедляет процесс декарбонизации. При этом противоположно влияют коэффициент диффузии и температура. Увеличение температуры и коэффициента диффузии ускоряет процесс декарбонизации, особенно температура, которая влияет на декарбонизацию через k_1 , p_0 и D . Проведенные нами широкомасштабные эксперименты подтверждают вышесказанное [3-7]. Для получения полной информации массообмена при декарбонизации CaCO_3 необходимо принять во внимание и теплообмен, что, естественно, усложняет задачу ввиду того, что мы имеем дело с неизотермичностью температурного поля.

Неизотермичность температурного поля сказывается на различии скоростей реакции декарбонизации CaCO_3 , связанной с различием температур кусков известняка.

Далее приводим решение задачи, выполненное Гельдом и Ивановым [14]. Для учета теплообмена принимаем во внимание граничные условия I рода на поверхности сферического куска:

$$T = T_a = \text{const} \quad (14)$$

Кроме известных уравнений (6) математическая задача должна содержать зависимость, определяющая развитие тепломассообмена. Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье имеет следующий вид:

$$c\delta dt/d\tau = \lambda(\partial^2 t/\partial x^2 + \partial^2 t/\partial y^2 + \partial^2 t/\partial z^2), \quad (15)$$

Для задачи декарбонизации известняка пренебрегаем расходом тепла на нагрев продуктов декарбонизации (CaO , CO_2).

Таким образом, выражение (15) запишем в виде:

$$\partial^2 t/\partial x^2 + \partial^2 t/\partial y^2 + \partial^2 t/\partial z^2 = 0, \quad (16)$$

Граничные условия задачи для куска CaCO_3 сферической формы:

$$\text{— на поверхности} \quad z=R, t=t_{\text{пов}}; \quad (17)$$

— в центре

$$r=0, \partial t/\partial r=0; \quad (18)$$

$$\text{— на границе (фронте) реакции} \quad r=r^*, t=t_p+\Delta t=t^*, \quad (19)$$

Решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье (15) запишется в виде:

$$t=t_{\text{пов}}-(t_{\text{пов}}-t^*) (R/r-1) \cdot r^*/(R-r^*), \quad (20)$$

Решение (20) характеризует температурное поле куска CaCO_3 , связано с тепловым потоком наружного слоя и тепловым эффектом декарбонизации CaCO_3 , при этом плотность теплового потока

$$q^* = -\lambda (\partial t / \partial r)_{r=r^*}; \quad (21)$$

Тепловой поток (21) расходуется на декарбонизацию CaCO_3 , т. Е.:

$$q^* = Q \delta \partial r^* / \partial \tau, \quad (22)$$

где Q – тепловой эффект к CaCO_3 .

Совместное решение уравнений (15), (16), (20) и (22) позволяет получить:

$$t_{\text{пов}} - t^* = -(Q \delta / \lambda) \cdot [r^* (R - r^*) / R] \partial r^* / \partial \tau \quad (23)$$

В нашем случае можно пренебречь перегревом реакционной зоны Δt , так как в доменных и обжиговых печах CaCO_3 разлагается при температуре $t = 900 \div 1000$ °C и $\Delta t = 30 \div 40$ °C. В связи с указанным допущением

$$(r^*)_{\tau=0} = R \text{ и } (r^*)_{\tau=0} = r^* \quad (24)$$

Уравнение (13) после интегрирования и соответствующих преобразований запишется в следующем виде:

$$\tau = \{Q_p / [\lambda (t_{\text{пов}} - t_p)]\} [R^2 / 6 + r^{*3} / (3r) - r^{*2} / 2] \quad (25)$$

Выражение (25) устанавливает связь количества декарбонизированного CaCO_3 и времени с другими параметрами и характеристиками процесса декарбонизации.

Время полной декарбонизации CaCO_3 можно определить из условия $r^* = 0$ по следующей зависимости

$$\tau_{\text{полн}} = (Q_p / \lambda) R^2 / [6(t_{\text{пов}} - t_p)] \quad (26)$$

В зависимости от вида известкового вяжущего различают три типа твердения (рис. 3) [1, 2, 9].



Рис. 3. Типы твердения известкового вяжущего
Fig. 3. Types of hardening of lime binder

Карбонатное твердение известки по-другому называется карбонизацией (рис. 4). Карбонизация – это процесс затвердевания, длительный по времени, растворных смесей, изготовленных на основе гашеной известки, при воздействии на них углекислого газа.

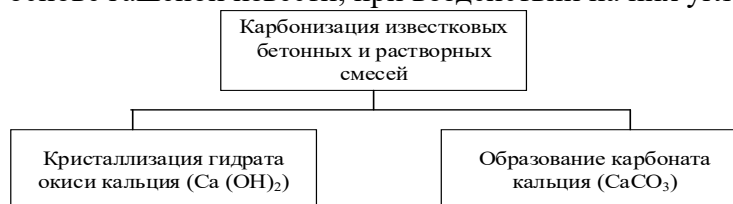
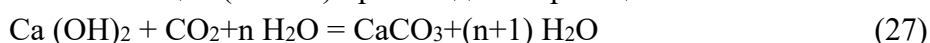


Рис. 4. Карбонатное твердение известковых и растворных смесей
Fig. 4. Carbonate hardening of lime and mortar mixtures

Образование карбоната кальция (CaCO_3) происходит по реакции:



При затворении водой CaO получаем гидроксид кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который представляет собой гелевидную массу. После удаления воды гелевидная масса известкового теста уплотняется и упрочняется. При высыхании в структуре уплотненной массы известкового теста образуются поры и капилляры, заполненные водой. Силы поверхностного натяжения вызывают внутреннее капиллярное давление, стягивающее частицы известки и заполнителя, что придает композиту дополнительную прочность [11-16].

Твердение известкового композита происходит в результате срачивания кристалликов, образующегося карбоната с частицами гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) и заполните-

ля. При карбонизации гидрата окиси кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ объем твердой фазы увеличивается. При увеличении объема твердой фазы дополнительно уплотняется и упрочняется твердеющий известковый композит. В процессе карбонизации образовывается, наряду с карбонатом кальция, разные соединения типа $\text{CaCO}_3 \cdot n \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot m \text{H}_2\text{O}$.

При твердении известкового композита очень медленно испаряется вода и медленно протекает процесс карбонизации. Процесс карбонизации может занять несколько десятков лет. Объясняется это тем, что карбонизация захватывает, преимущественно, поверхностный слой при малой концентрации углекислого газа CO_2 (примерно 0,03 %), а большая плотность пленки, образующегося карбоната, затрудняет дальнейшее проникание CO_2 во внутрь известкового композита. В начальный период твердения композитов из гашеной извести на рост их прочности влияют процессы высыхания и перекристаллизации частиц $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Воздушные и гидравлические известковые вяжущие вещества можно производить промышленным способом [4]. Известь может применяться в качестве вяжущего для ремонтно-реставрационных растворов с соответствующим подбором соотношений по объему и введением необходимых наполнителя, заполнителя и добавки, что планируется в экспериментальной части работы [5, 7]. Введение заполнителей, наполнителей и добавок важно для обеспечения оригинальности разработанных ремонтно-реставрационных составов.

При карбонизации выделяется вода, которая способствует замедлению карбонизации. В оптимальном режиме карбонизация осуществляется при влажности составов от 4 до 7%. При введении в ремонтно-реставрационные составы инертных заполнителей значительно уменьшаются усадочные деформации, что очень важно для обеспечения качества ремонтных, восстановительных и реставрационных работ.

Например, при введении в известковые составы кварцевого песка тонкого помола происходит взаимодействие между кремнеземом и известью, способствующее ускорению процесса твердения и увеличению прочности на сжатие и растяжение при изгибе, что связано с аморфизацией поверхностных слоев кварцевых частичек при увеличении тонкости помола и возрастанием их активности при взаимодействии с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [1, 2]. Таким образом, можно карбонизировать ремонтно-реставрационные составы искусственным путем.

Обсуждение результатов. Результаты исследований подтверждают возможность получения известковых композитов с помощью искусственной карбонизации и достижения при этом высокой прочности на сжатие ($250 \div 350 \text{ кг/см}^2$). Значительную эффективность показали композиты на основе молотой негашеной извести с добавкой 0,2% от веса извести мелассы. Добавление мелассы способствует ускорению карбонизации и повышению прочности. Результаты исследований выявили зависимость интенсивности карбонизации от содержания воды и влажности. Удаление воды или снижение влажности путем сушки снижает процесс карбонизации. Установлено также, что высокая влажность прекращает карбонизацию. Декарбонизация при производстве известковых вяжущих и карбонизация ремонтно-реставрационных составов и других известковых материалов, в том числе и с применением искусственных методов, недостаточно исследованы, и, соответственно, разработки в этом направлении имеют научную и практическую ценность.

Исходными материалами для производства вяжущих веществ являются различные горные породы. Магнезиальные вяжущие получают из природных магнезитов и доломитов, а гидратную и гидравлическую известь из карбонатных горных пород (известняки, мел, доломиты, мергели), что является основным вяжущим в составе ремонтно-реставрационной композиции. По результатам исследований отобранных проб раствора кладки стен башенных строений и путем изучения сведений литературных источников, касающихся опыта строительства, реставрации, ремонта и восстановления ОКН, свидетельских показаний жителей горных районов, а также умозрительного анализа разработаны составы растворов на основе воздушной и гидравлической известей и органических добавок (табл. 1).

Таблица 1. Экспериментальные составы раствора для каменной кладки стен старинных башенных и некропольных строений на одну балочку 4x4x16 см
Table 1. Experimental mortar compositions for masonry of ancient tower and necropolis buildings for one beam 4x4x16 cm

№ состава Number	Извест- ковос тесто, гр. Lime dough	Слан- цевая крош- ка, гр. Slate crumb, gr.	Доло- митовый песок фр. 0-2,5, гр. Dolomite sand fr. 0-2.5, gr.	Цемьянка, гр. Cemenka, gr.	Вода, гр. Water,	Клей казеи- новый, гр. Casein glue,	Известь пушонка, гр. Slaked lime, gr.	Древес- ная зола, гр. Wood ash, gr.	Яичная масса, гр. Egg mass, gr.	Творог обезжи- ренный, гр. Low-fat cottage cheese, gr.	Фибра стеклово- локонная, гр. Glass fiber, gr.	Просто- кваша, гр. Sour milk, gr.
1	-	180	310	40	-	80	25	7	-	-	-	-
2	-	180	310	35	-	78	24	8	-	-	-	-
3	84	165	280	35	7	-	-	7	-	17	-	-
4	84	165	280	31	8	-	-	14	15	13	-	-
5	-	235	150	25	-	96	35	9	-	-	-	-
6	90	230	150	26	30	-	-	-	-	9	-	-
7	84	168	299	26	47	2	-	14	-	-	-	-
8	85	220	143	25	35	2	-	-	-	-	1	-
9	84	161	300	19	24	5	-	13	-	-	-	-
10	70	272	86	18	22	7	-	10	-	-	-	-
11	70	272	86	25	22	7	-	10	-	-	-	-
12	-	330	-	-	-	-	60	40	43	-	-	30
13	-	360	-	-	-	-	103	30	-	-	-	55

Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора представле-
ны в табл. 2.

Таблица 2. Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора
Table 2. Physical and mechanical properties of experimental solution compositions

№ экспериментального состава Experimental composition No.	Прочность на растяжение при изгибе, кг/см ² Tensile strength in bending, kg/cm ²	Прочность сцепления раствора в каменной кладке, кг/см ² Adhesion strength of mortar in masonry, kg/cm ²	Прочность на сжатие, кг/см ² Compressive strength, kg/cm ²
1	0,5	0,3	4,7
2	12,9	0,9	15,4
3	15,5	1,65	29,2
4	1,1	0,6	8,8
5	11,0	0,9	14,3
6	0,4	0,4	5,7
7	0,4	0,5	4,0
8	0,7	0,3	3,82
9	8,5	1,75	41,0
10	0,4	0,3	3,5
11	0,4	0,3	3,1
12	4,7	1,48	25,4
13	0	0	0,2

Применяемые для ремонта, реставрации и восстановления памятников истории и культуры составы являются многокомпонентными, так как при их приготовлении используются различные добавки органического происхождения (рис. 5).

Для приготовления ремонтно-реставрационных составов оптимальной является гидравлическая известь. Ремонтные и реставрационные смеси на гидравлической извести пластичной консистенции при 28-суточном твердении дают прочность на сжатие 30 кг/см² и более – в зависимости от гидравлического модуля использованного гидравлического вяжущего. Долговечность ремонтных и реставрационных растворов на гидравлической извести сравнительно высока, поэтому памятники истории и культуры XV-XVI вв., уцелевшие от техногенных воздействий, сохранили свою несущую способность [2, 4, 6].

Соотношения компонентов устанавливаются в зависимости от требуемой марки смеси (гидравлическая известь, сланцевая крошка, доломитовый песок, цемьянка, зола, казеин). Пропорции компонентов представлены в табл. 3.

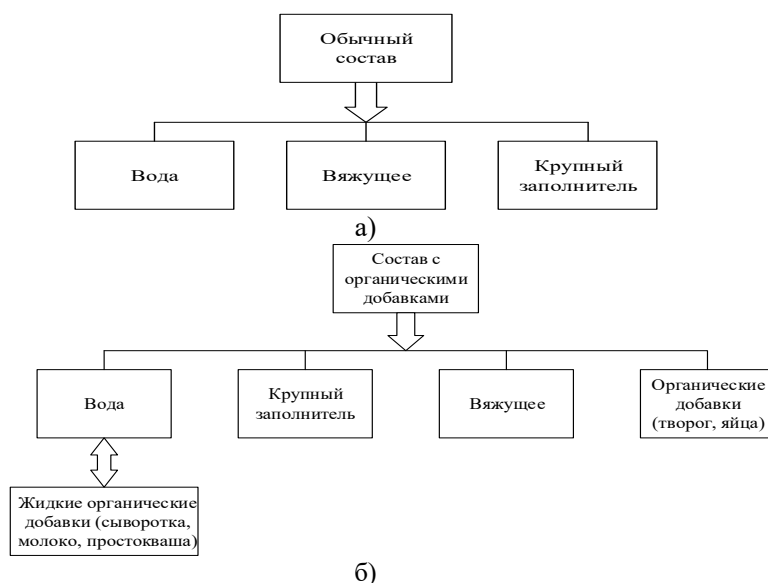


Рис. 5. Обычный состав (а) и состав с органическими добавками (б)

Fig. 5. Conventional composition (a) and composition with organic additives (b)

Марка раствора определялась испытанием на сжатие балочек размерами 40x40x160 мм в возрасте 28 суток при температуре твердения 20±3°C.

Таблица 3. Экспериментальные составы раствора для каменной кладки стен старинных башенных и некропольных строений на одну балочку 4x4x16 см

Table 3. Experimental mortar compositions for masonry of walls of ancient tower and necropolis buildings for one beam 4x4x16 cm

№/ No. состава	Сланцевая крошка, гр. Slate crumb, gr.	Доло-митовый песок фр. 0-2,5, гр. Dolomite sand fr.	Цемянка, гр. Semenka, gr.	Вода, гр. Water	Гидравлическая известь, гр Hydraulic lime	Известь пушонка, гр. Slaked lime, gr	Древесная зола, гр. Wood ash, gr.
1	160	250,8	19,4	90	39	44,2	1
2	182,5	243,2	23	69,3	30,7	42,7	2
3	91	272	23,5	123	33,2	47	1
4	160	250,8	19,4	120	83	-	1
5	182,5	243,2	23	130	73	-	2
6	91	272	23,5	123	80,6	-	1
7	160	250	19	190	79	-	1
8	160	250	19	174	40	39	1
9	91	270	24	170	80	-	1
10	180	240	19	175	70	-	2
11	180	250	19	170	73	30	1

Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора представлены в табл. 4.

Таблица 4. Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора

Table 4. Physicomechanical properties of experimental solution compositions

№ экспериментального состава No.	Прочность на растяжение при изгибе, кг/см ² Tensile strength in bending, kg/cm ²	Прочность на сжатие, кг/см ² Compressive strength, kg/cm ²
1	2,22	19,8
2	2,13	16,0
3	1,89	5,6
4	2,34	20,0
5	0,93	6,0
6	2,03	6,2
7	2,22	46,68
8	2,13	47,06
9	1,9	21,6
10	2,1	25,66
11	0,9	33,0

Вывод. Исследован тепломассообмен в процессах диссоциации (декарбонизации) и карбонизации воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и ремонтно-реставрационных составов на их основе и рассчитаны фронт разложения, границы разложения известняка, время диссоциации и скорость реакции диссоциации.

Изучены типы твердения извести (карбонатное, гидратное и гидросиликатное) и механизм ее твердения. Выявлена зависимость интенсивности карбонизации от содержания воды и влажности. Рассмотрены технологии промышленного и кустарного производства воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ.

В результате выполненных исследований разработаны новые материалы и технологии для ремонта, восстановления и реставрации ОКН (памятников истории и культуры), отвечающие предъявляемым ремонтно-реставрационным требованиям. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения разработанных ремонтно-реставрационных составов составляет около 5,5 млн. рублей.

Библиографический список:

1. Амханицкий Г.Я. Исследование фазовых превращений виброгазобетона в наружных стеновых панелях / Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. // Левин С.Н., Юдина Т.П. - Таллин. - 1978. - С.94-98.
2. Багров Б.О. Карбонизационная стойкость бетона на шлакощелочном вяжущем // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. - Таллин. - 1981. - С.97-99.
3. Батаева П.Д. Магнезиальное вяжущее для приготовления ремонтно-реставрационного состава // Вестник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук – 2020. – № 4. – С. 43-49.
4. Батаева П.Д. Обзор составов и технологий для ремонта и реставрации объектов культурного наследия // Вестник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук. – 2021. – № 5. – С. 49-53.
5. Батаев Д.К.-С. Органо-неорганические вяжущие для ремонта и реставрации памятников истории и культуры башенного типа / Шеина С.Г., Муртазаев С.-А.Ю., Батаева П.Д. // Материалы конференции «Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика», приуроченной к 60-летию член-корреспондента Академии наук ЧР, доктора технических наук, профессора Сайд-Альви Юсуповича Муртазаева. – Грозный: АЛЕФ, – 2021. – С. 129-135.
6. Баженов Ю.М. Перспективы разработки наноструктурных полимеркомпозитов в Чеченской Республике / Батаев Д.К.-С., Муртазаев С.-А.Ю., Мажиев Х.Н., Батаева П.Д. // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». Том I. – Грозный: ГГНТУ, 2014. – С. 51-62.
7. Батаева П.Д. Составы для ремонта, восстановления и реставрации объекта культурного наследия // IV Международное книжное издание стран Содружества Независимых Государств «Лучший молодой ученый - 2021». Нур-Султан: Международная ассоциация молодых ученых, 2021. – С. 53-58.
8. Камерлох Н.А. К вопросу о механизме перекристаллизации микроструктуры ячеистых бетонов при карбонизации // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. Таллин. 1984. Ч.1. - С.129-131.
9. Тимаков Ю.В. Исследование процессов карбонизации и увлажнения наружных газобетонных панелей с различными отделками при службе в стене дома // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. - Таллин. - 1978. - С.90-93.
10. Телегин А.С. Тепломассоперенос: Учебник для вузов: 2-е изд., перераб. и доп. / Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. // Под редакцией Ю.Г. Ярошенко. – М.: ИКС «Академкнига», 2002. -455 с.
11. Kruml F. Influence of saturation degree of autoclaved aerated concretes on their creep, Autoclaved Aerated Concretes, moisture and Properties, Netherlands, 1983, s. 249-256.
12. Lach V. Problemy karbonatuce lehkych beton. - Stavebni vyzkum, 1971, 15, № 4, p.1-7.
13. Matoušek M., Miškovský I. Pusěvek k Trvanlivosty některých porobetonových staved. Sbornik VUT v brně, 1971, N1-4, s. 301-307.
14. Parrot L.I. Increase in Creep of Hardened Cement Past due to Carnonaion unde Load. - Magazine Concrete Research, 1975, IX, v.27, № 92, p. 181-187.
15. Schaffler H., Druckfestigkeit von dampfgehartetem Casbeton nach, vershildener lagerung. - In: Ligttweight Concrete / RILEM, Göteborg, 1961, s. 62-78.
16. Vasicek I. Trvanlivost a odolnost autoklavovovanych porovitych betonu pri posobeni susnych Vnejsich jena. - Stavivo, 1965, N6, p. 136-149.

References:

1. Amkhanitsky G.Ya. Investigation of phase transformations of vibro-aerated concrete in external wall panels / Levin S.N., Yudina T.P. *Durability of structures from autoclaved concrete*. Tallinn. 1978;94-98.
2. Bagrov B.O. Carbonization resistance of concrete based on slag-alkali binder. *Durability of structures made of autoclaved concrete*. Tallinn. 1981;97-99.
3. Bataeva P.D. Magnesian binder for the preparation of repair and restoration composition. *Bulletin of the Complex Research Institute. H.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences* 2020(4): 43-49. (In Russ)
4. Bataeva P.D. Review of compositions and technologies for the repair and restoration of cultural heritage objects. *Bulletin of the Complex Research Institute. H.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences*. 2021;5: 49-53. (In Russ)
5. Bataev D.K-S. Organo-inorganic binders for the repair and restoration of monuments of history and culture of the tower type / Sheina S.G., Murtazaev S-A.Yu., Bataeva P.D. Proceedings of the conference "Topical issues of modern science: theory, technology, methodology and practice", dedicated to the 60th anniversary of the Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Chechen Republic, Doctor of Technical Sciences, Professor Said-Alvi Yusupovich Murtazaev. - Grozny: ALEF, - 2021; 129-135. (In Russ)
6. Bazhenov Yu.M. Prospects for the development of nanostructured polymer composites in the Chechen Republic / Bataev D.K-S., Murtazaev S-A.Yu., Mazhiev Kh.N., Bataeva P.D. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of GGNTU im. acad. M.D. Millionshchikov. Volume I. - Grozny: GGNTU, 2014;51-62. (In Russ)
7. Bataeva P.D. Compositions for the repair, restoration and restoration of a cultural heritage site // IV International Book Edition of the Commonwealth of Independent States "Best Young Scientist - 2021". - Nur-Sultan: International Association of Young Scientists, 2021; 53-58.
8. Kamerlokh N.A. To the question of the mechanism of recrystallization of the microstructure of cellular concretes during carbonization. *Durability of structures from autoclave concretes*. Tallinn. 1984;1:129-131.
9. Timakov Yu.V. Investigation of the processes of carbonization and moistening of external aerated concrete panels with various finishes during service in the wall of a house. *Durability of structures from autoclaved concrete*. Tallinn. 1978;90-93.
10. Telegin A.S. Heat and Mass Transfer: Textbook for High Schools: 2nd ed., Revised. And extra. Shvydkiy V.S., Yaroshenko Yu.G.. Under the editorship of Yu.G.Yaroshenko. M.: ICS "Akademkniga", 2002; 455. (In Russ)
11. Kruml F. Influence of saturation degree of autoclaved aerated concretes on their creep, Autoclaved Aerated Concretes, moisture and Properties, Netherlands, 1983; 249-256.
12. Lach V. Problemy karbonatuce lehkych beton. - Stavebui vyzkum, 1971;15(4):-7.
13. Matoušek M., Miskovský I. Pusěvek K. Trvanlivost některých porobetonových staved. Sbornik VUT v brně, 1971;1-4: 301-307.
14. Parrot L.I. Increase in Creep of Hardened Cement Past due to Carnonaion unde Load. - Magazine Concrete Research, 1975; IX.27(92):181-187.
15. Schaffler H., Druckfestigkeit von dampfgehartetem Casbeton nach, vershildener lagerung. - In: Light-weight Concrete. *RILEM, Göteborg*, 1961; 62-78.
16. Vasicek I. Trvanlivost a odolnost autoklavovovanych porovitych betonu pri posobeni susnych Vnejsich jena. - Stavivo, 1965;6:136-149.

Сведения об авторах:

Батаева Петимат Денаевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории металлов, сплавов и композиционных материалов; bataeva_ggntu@mail.ru

Аларханова Зура Зилаудиновна, кандидат химических наук, доцент, заведующая лабораторией высокомолекулярных соединений; alarh2000@mail.ru

Батаева Хава Маршаниевна, младший научный сотрудник лаборатории высокомолекулярных соединений; ya.vashka@mail.ru

Батаев Адам Денаевич, аспирант; adam.bataev1993@mail.ru

Information about the authors:

Petimat D. Bataeva, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of metals, alloys and composite materials; bataeva_ggntu@mail.ru

Zura Z. Alarkhanova, Cand. Sci. (Chemical), Assoc. Prof, Head of the laboratory of high-molecular compounds; alarh2000@mail.ru

Khava M. Bataeva, Junior Researcher, Laboratory of high-molecular compounds; ya.vashka@mail.ru

Adam D. Bataev, Postgraduate Student; adam.bataev1993@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 15.06.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 21.07.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 11.10.2024.