



Review Article

Received: January 10, 2024

Accepted: February 24, 2024

Published: March 20, 2024

ISSN 2658-5553

Overview of developments in the field of adobe bricks

Kirsanova, Tatyana Akeksandrovna¹ Chistyakov, Vladimir Anatolyevich² Hamid, Rahmani³ Vdovchenkov, Evgeny Viktorovich² Aramova, Olga Yurievna⁴ Alliluyeva, Ekaterina Vladislavovna² 

¹ Laboratory of Mechanics of Multicomponent and Multiphase Media, Saint Petersburg, Russian Federation; 89094001052@mail.ru

² Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation; vladimirchi@yandex.ru (C.V.A.); vdovchenkov@yandex.ru (V.E.V.); katherine_bio@mail.ru (A.E.V.)

³ University of Zanjan, Zanjan, Iran; hrahmani@znu.ac.ir

⁴ Laboratory of Paleogeography of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation; aramova@sfedu.ru

Keywords:

Adobe; Adobe brick; Brick; Clay; Manure; Molecular interaction

Abstract:

Reactions and biological processes in the adobe mixture represent the integration of biological and technological aspects, which opens new prospects for research in the field of biomineralization of building materials. **The object of research** is an adobe brick, in which various biological and molecular interactions of its constituent components occur. **Method.** A detailed description of the methodology of the literature search research has been carried out and current world research on the use of adobe bricks in construction has been systematized. **Results.** A review of studies on the properties of moisture capacity, compressive strength, thermal insulation properties and durability properties of adobe has been conducted. The influence of chemical processes on its properties is considered, problems and limitations associated with the use of adobe bricks are identified, based on which conclusions are drawn and recommendations for further research are proposed. The role of biological processes in adobe brick construction technology is considered.

1 Introduction

Саман представляет собой композитный строительный материал, изготовленный из глины, смешанной с водой и органическими материалами, такими как солома и навоз. Преимущественно, он использовался при строительстве в средней Азии и в южных регионах России, а также Украины и Молдавии. История использования саманного кирпича берет свое начало в 5–4 тысячелетии до н.э., когда его начали производить древние египтяне.

Актуальность и долговечность саманного строительства задокументированы во многих работах [1], [2], [3], [4].

К недостаткам самана относится неустойчивость к воде и влаге, хрупкость и низкая прочность на сжатие в сравнении с его строительными аналогами.

Анализ международных баз данных научных публикаций показывает, что за прошедшие 5 лет была опубликована лишь одна обзорная статья, в которой систематизированы данные исследований по использованию волокон (преимущественно полученных из отходов) в качестве армирующего материала при производстве саманного кирпича. Исследовано влияние



добавления этих отходов на физические и механические свойства, в сравнении с представленными в литературе. Отмечается, что при введении комбинации добавок из отходов можно ожидать улучшения свойств самана. Использование отходов для строительной промышленности, как правило, представляет интерес и полезно для исследователей, активно стремящихся разработать методические подходы к количественной оценке, оптимизации и тестированию эффективности использования таких добавок из отходов. Между тем в данной работе недостаточно подробно освещены некоторые важные вопросы, в частности отсутствуют результаты критического анализа материалов по использованию химических и армирующих компонентов, что обуславливает необходимость подготовки данной работы, цель которой упорядочить данные по характеристике условий и процессов, влияющих на механические и физические свойства самана.

Для реализации цели исследования необходимо решить ряд задач:

1. Провести подробное описание методологии исследования поиска литературы, систематизировать актуальные мировые исследования по применению саманного кирпича в строительстве;
2. провести обзор существующих исследований, касающихся: а) свойства влагоёмкости саманного кирпича и его потенциала; б) свойства прочности на сжатие саманного кирпича и его потенциала; в) теплоизоляционных свойств саманного кирпича и его потенциала; г) свойства долговечности саманного кирпича.
3. рассмотреть влияние химических процессов на свойства: а) влагопоглощения; б) прочности; в) теплоизоляции; г) долговечности;
4. выявить потенциальные проблемы и ограничения, связанные с использованием саманного кирпича, сделать выводы и предложить рекомендации для дальнейших исследований и применения саманного кирпича в строительстве;
5. рассмотреть роль биологических процессов в технологии строительства из саманного кирпича.

2 Literature Search Methods

В этом разделе приводится подробное описание методологии исследования. Оно начинается с тщательной формулировки целей и задач исследования. Поиск научной литературы проводится с использованием базы данных Scopus для сбора широкого спектра соответствующих работ. Используется комбинация релевантных ключевых слов «adobe AND brick» и фраз, относящихся к теме исследования. Выбранные ключевые слова были подобраны, чтобы обеспечить всесторонний охват соответствующей литературы. Временной интервал соответствовал периоду последних 5 лет (с 2018 по 2023 год, рисунок 1а). По типу документа была выбрана фильтрация «article» (рисунок 1б). Из ключевых слов отмечены «adobe», «adobe brick» и «adobe bricks». С учетом данных ключевых слов и фильтраций за выбранный интервал времени было найдено 26 статей исследовательского типа и 1 статья обзорного характера.

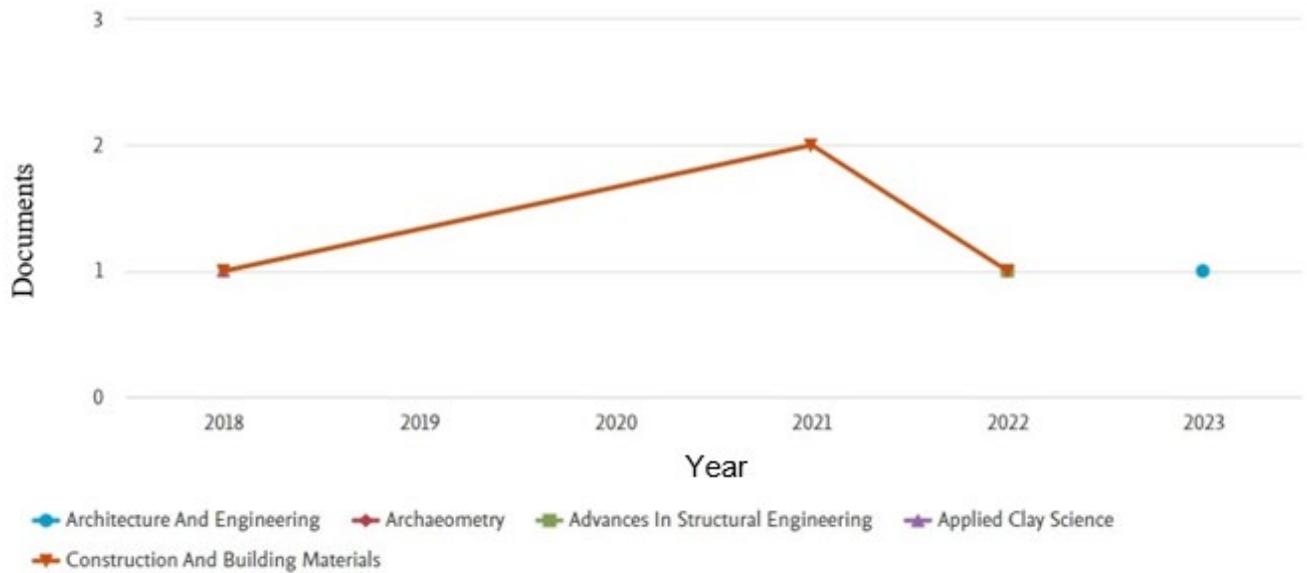


Fig. 1a - Analysis of sources by year
Рис. 1а – Анализ источников по годам

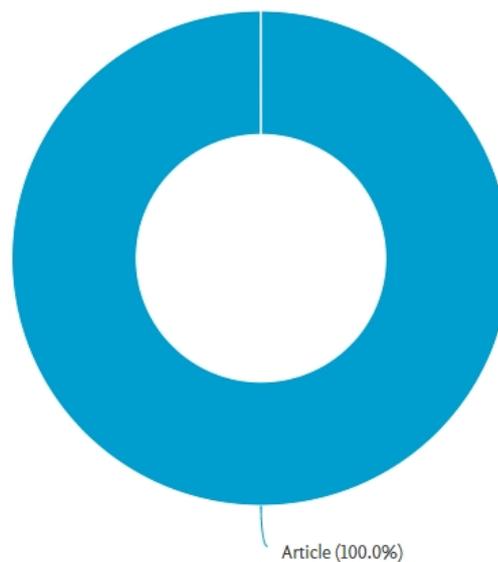


Fig. 1b - Analysis of sources by document type
Рис. 1б – Анализ источников по типу документов

Собранные данные подвергаются анализу с использованием программного обеспечения VOSviewer, данное программное обеспечение позволяет создать визуальные представления о совпадении ключевых слов, авторов и публикаций в наборе данных (рисунок 2а и 2б).

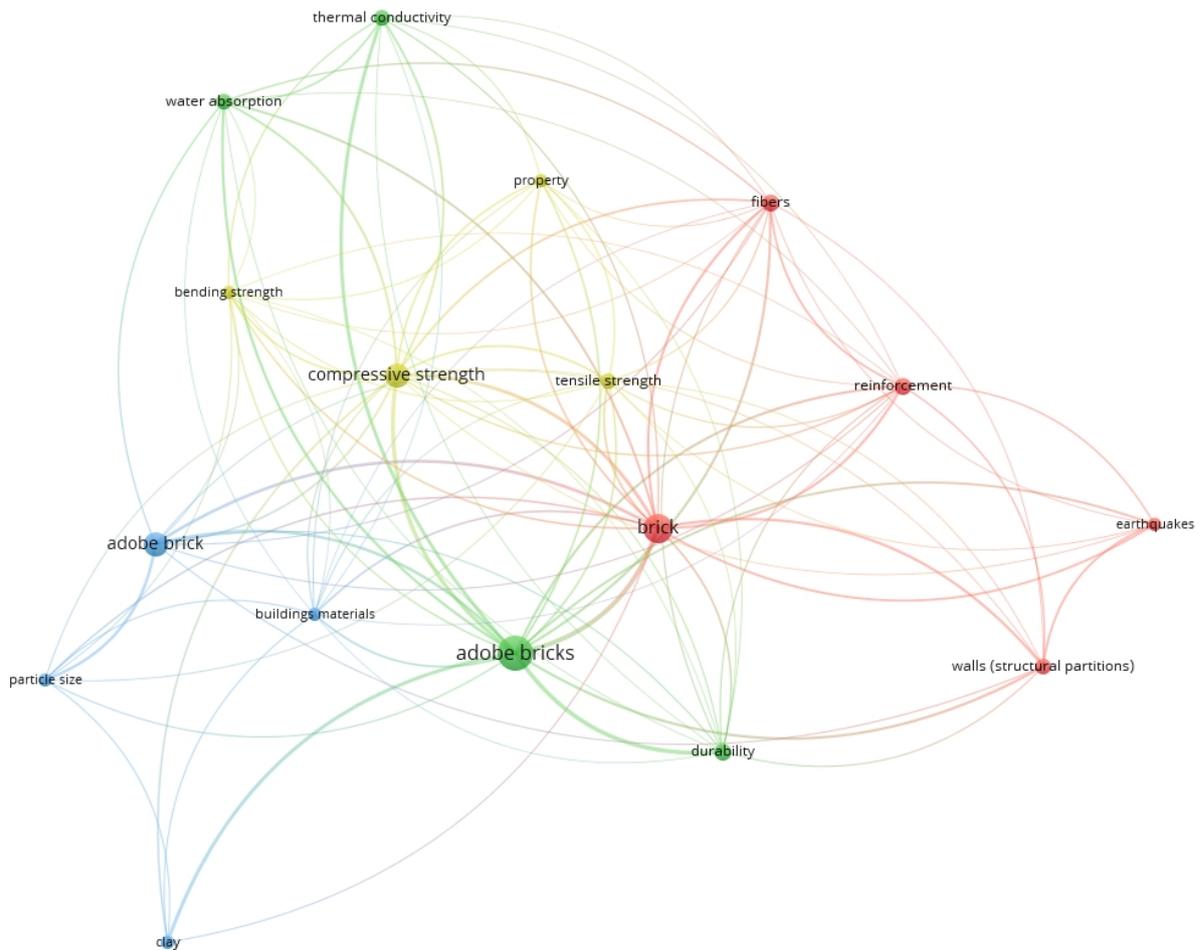


Fig. 2a - Analysis of search results data using VOSviewer software

Рис. 2a - Анализ данных результатов поиска при помощи программного обеспечения VOSviewer

Этот анализ позволил получить информацию о наиболее важных темах исследований, закономерностях и взаимосвязях между различными концепциями.

Результаты анализа VOSviewer были объединены для создания объемной картины литературного ландшафта, связанного с темой исследования. Объединенные результаты позволили нам определить ключевые тенденции исследований, влиятельных авторов и значительные группы связанных публикаций. Интерпретированные результаты анализа данных обсуждались в контексте целей исследования и существующей литературы. Результаты были критически проанализированы, чтобы сделать значимые выводы и определить потенциальные области для будущих исследований.

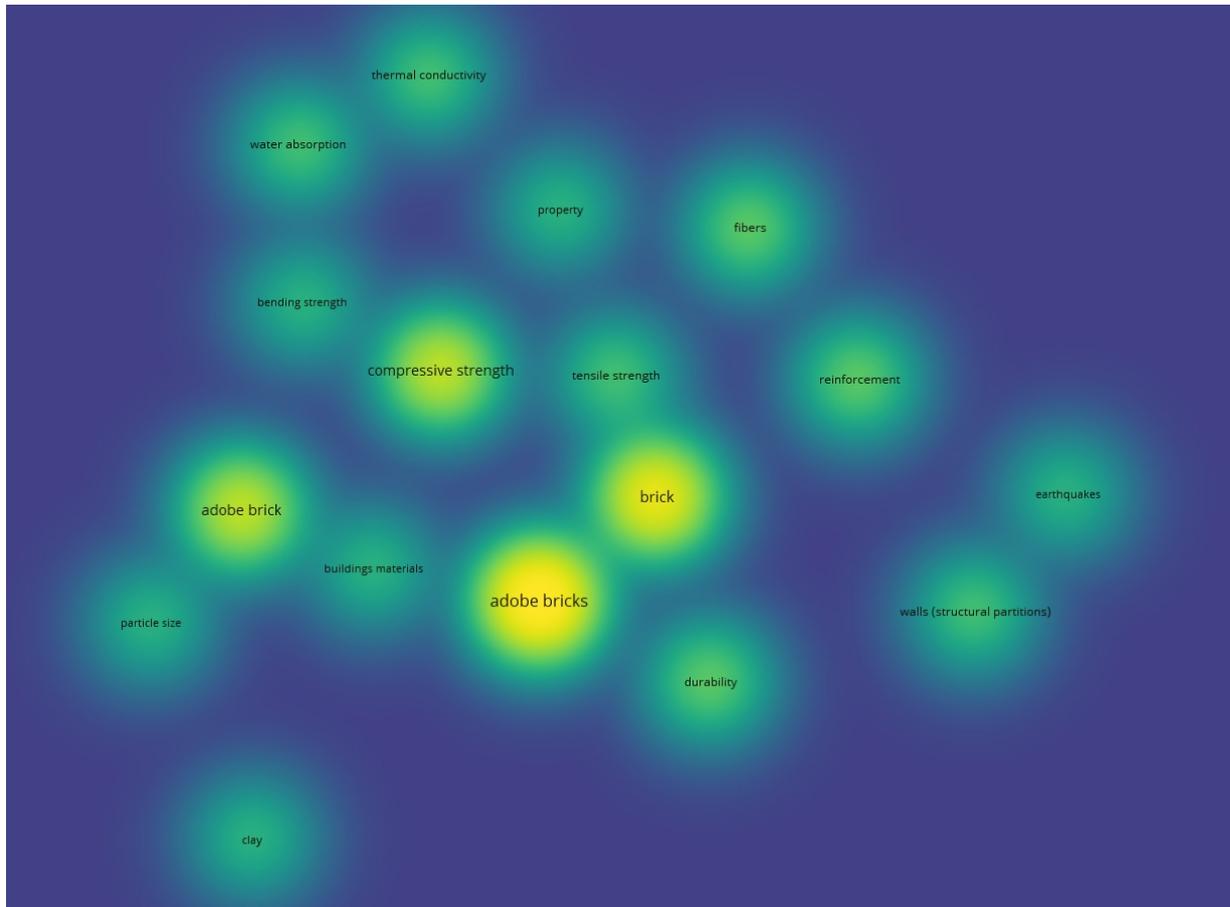


Fig. 2b - Analysis of search results data using VOSviewer software

Рис. 2 б- Анализ данных результатов поиска при помощи программного обеспечения VOSviewer

Этот методологический подход, позволяет обеспечить тщательное и систематическое изучение существующей литературы и заложить прочную основу для последующих этапов анализа и обсуждения.

3 Literature Review

Саман обладает некоторыми нежелательными свойствами, такими как восприимчивость к воде [5], [6] хрупкость [7], [8] и низкая прочность на сжатие и растяжение [9], [10] по сравнению с другими распространенными строительными материалами. Такие недостатки можно устранить, усилив почвенную смесь добавками или стабилизаторами [11]. Использование добавок в саманном кирпиче рассматривается во многих исследованиях [12]. Большая часть исследований в этой области основана на гипотезе о том, что свойства кирпича могут быть улучшены при помощи добавления натуральных материалов и отходов [13], [14].

Включение определенных добавок создает сеть волокон, которая может помочь уменьшить размер усадочных трещин и прочность на растяжение после растрескивания [15]. Аналогичным образом были исследованы улучшенные тепловые и акустические свойства саманного армированного кирпича благодаря его пористой структуре [16].

В исследованиях используются самые разнообразные составы глины и методы ее приготовления для улучшения эксплуатационных характеристик саманного кирпича путем выборочного использования отходов при его производстве.

3.1 Water-holding property of adobe

Способность самана к поглощению и выделению влаги позволяет ему поддерживать внутренний микроклимат в здании [17], [18]. Таким образом регулируется влажность в помещении, что является необходимым при жарком и влажном климате [19]. Однако, в случае сырого климата или некорректной обработки и защиты материала, влага может стать проблемой [20].



Насыщенность воздуха парами влаги, которая зависит от возможности испарения вод с поверхности водоёмов, количества грунтовых вод или осадков и пр. влияет не только на свойства гигроскопических материалов с большой микропористостью, к которым относится саман [21], но и на самочувствие человека [22]. В случае недостаточной вентиляции саманные стены могут поддерживать высокую слишком влажность внутри помещений [23]. Это может привести к появлению конденсата, развитию плесени [24], бактерий [25] и, как следствие, проблемам со здоровьем, особенно для людей с аллергией или астмой [26].

Гигроскопичность, конденсация и свойство влагопоглощения способны в несколько раз изменить свойства самана [27]. Именно это обстоятельство обуславливает преимущественное использование саманного кирпича в регионах с сухим и жарким климатом, где период высоких температур достаточно продолжителен, а осадки в минимальны [28]. Однако прибрежные зоны в зимний период по климатическим характеристикам имеют повышенную влажность воздуха, что требует установления зависимостей свойств саманного кирпича от влажности окружающей среды и уменьшение влагопоглощающих свойств [29]. При этом пористость кирпича положительно сказывается на плотности [30], [31], а следовательно, и весе строительного материала, что дает возможность уменьшения травматизма при разрушении зданий в сейсмоопасных зонах.

Чтобы помочь лучше понять поведение глиняных материалов при возведении зданий изучили влияние стабилизации с использованием портландцемента и негашеной извести [32], армированных волокнами финиковой пальмы на набухание самана, помимо ее воздействия на их физические характеристики. В качестве примера авторы [6] взяли одно из саманных строений Алжира, и изучили различные смеси кирпича. Результаты показали, что стабилизация в целом улучшила свойства саманного кирпича, в отличие от изменчивого воздействия волокон. Водопоглощение и набухание были снижены за счет стабилизации, но и то, и другое увеличивалось при наличии волокон.

Исследование [1] сосредоточено на анализе тенденций внедрения переработанных материалов в смеси самана. В качестве сырья вместо натуральной глины использовались отходы производства красного глиняного кирпича, а в качестве альтернативного связующего использовался известняковый порошок. Протестировано влагопоглощение саманных кирпичей. В этом случае оно соответствовало критериям стандартных значений для обожженных глиняных кирпичей или кирпичей на основе золы.

В работе [33] исследованы геополлимерные саманные кирпичи из золы рисовой соломы. Их водопоглощение измеряли при содержании золы 0%, 5%, 10% и 20% и содержании гидроксида натрия 2.5%, 5%, 7.5% и 10% после отверждения композита в течение 28 дней. Результаты показали, что увеличение содержания золы с 0% до 20% снижало водопоглощение. Увеличение содержания гидроксида натрия с 2.5% до 10% действовало также. Наилучшие условия для минимизации водопоглощения были при содержании 10% гидроксида натрия и 20% золы. При этом минимальное влагопоглощение составило 8,3%.

В качестве армирующего материала в саман могут добавляться волокна дерева нима (*Azadirachta indica*). Лабораторные эксперименты [34], включили определение водопоглощения и были проведены на саманных кирпичях, изготовленных из грунта и армированных двумя типами волокон нима (солома и листья) с содержанием последних 0, 1, 2, 3 и 4%. Было обнаружено, что механические, термические и долговечностные свойства самана были глобально улучшены. Кроме того, волокна листьев нима вносят значительный вклад в комфортную термическую обработку, но их использование отрицательно сказывается на долговечности. Тем не менее, блоки самана, армированные волокнами нима, подходят в качестве строительных материалов со значительным тепловым комфортом и низкой нагрузкой на окружающую среду.

В статье [35] исследуется производство традиционных саманных кирпичей с акцентом на влияние типа и количества волокон. Несколько саманных кирпичей были произведены в лаборатории с использованием 30–70% по объему опилок или соломы. Жмыхи из опилок обладают улучшенными механическими свойствами, в то время как жмыхи из соломы имеют более низкую сорбционную способность.

Саманный кирпич, изготовленный из почвы в провинции Чантхабури, Таиланд, был разработан и объединен с паракаучуковым латексом и кокосовой койрой для обеспечения экологической безопасности. В исследовании [36] зафиксировано содержание воды в соотношении 0.4% воды на каждую часть веса почвы. Это количество воды было подходящим для замешивания и формования саманного кирпича. Паракаучуковый латекс добавляли в традиционную смесь в соотношении 5, 10, 15 и 20% от общей массы смеси. Кокосовая койра была



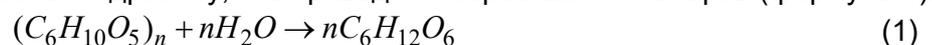
добавлена для усиления структуры в количестве 1.0% от массы почвы. Водопоглощение саманного кирпича было исследовано в возрасте 28 дней. Результаты показали, что смеси, содержащие паракаучуковый латекс и не содержащие кокосовую койру, обладают свойством низкого влагопоглощения. Все образцы сохраняли форму после 28 дней погружения в воду. В то время как традиционная смесь и смеси с кокосовой стружкой расплывались в течение 24 часов.

Исследования показывают, что повторное набухание глинистых минералов связано с различной деформацией во время циклов увлажнения и сушки, что может вызвать разрушение материала, богатого глиной. Образование отложений из-за этого процесса наблюдалось на некоторых видах глины, связывающей камень, а также на земляных материалах, используемых в архитектуре. В исследования по сохранению богатых глиной песчаников привели к использованию бифункциональных катионных поверхностно-активных веществ в качестве средств, снижающих набухание песчаников с высокой гигроскопичностью и гидратационной дилатацией. В статье [37] поверхностно-активное вещество дихлорид бутилдиаммония было добавлено в глиняный материал для уменьшения гигроскопического расширения, которое приводит к быстрому и существенному разложению глиняного материала. Ряд экспериментов показала большое влияние добавки на различные физико-механические свойства формованных глиняных смесей. Однако, в зависимости от концентрации поверхностно-активного вещества, используемого в смеси из смоченного глиняного самана, также меняются другие свойства, такие как ультразвуковая скорость, коэффициент поглощения воды, гидрическое сжатие и прочность на сжатие. Таким образом, данная статья подчеркивает важные влияния на изменение свойств саманных кирпичей в зависимости от концентрации поверхностно-активного вещества и катионной емкости образца.

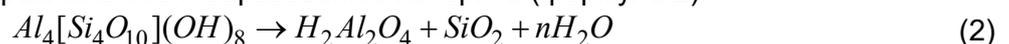
Высокая влагоемкость самана имеет как положительные [38], [39], так и отрицательные стороны [40], [41] в зависимости от ряда факторов. Способность саманного кирпича поглощать и выделять влагу позволяет регулировать влагу в помещении и создавать комфортный микроклимат. Это особенно важно в жарком и влажном регионе, где саман может помочь снизить влажность внутри помещений. В то же время высокая влагоемкость может помочь смягчить жесткость материала и уменьшить его вес, что особенно полезно при строительстве в сейсмоопасных зонах. Однако в климате с повышенной влажностью при некорректной обработке и защите материала свойство высокой влагоемкости способно привести к проблемам. При недостаточной вентиляции воздуха в саманных помещениях образуется высокая влажность. Это ведет к конденсации, росту плесени и бактерий, что негативно сказывается на прочности помещения и на здоровье человека. Таким образом, управление влагообменом в самане является ключевым аспектом при проектировании и строительстве зданий. Необходимо учитывать климатические условия и применять соответствующие техники и материалы для достижения оптимального баланса влагообмена для создания комфортного и устойчивого внутреннего микроклимата.

3.1.1 The influence of chemical processes on the moisture-absorbing properties of adobe

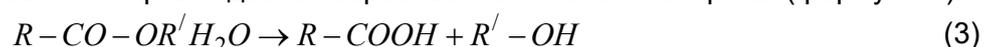
При контакте с водой органические вещества из навоза начинают разлагаться под действием ферментов, превращаясь в более простые молекулы. Например, полимеры углеводной природы подвергаются гидролизу, что приводит к образованию сахаров (формула 1).



Гидролизу подвержены и неорганические материалы глины, в частности каолинит. Гидролиз приводит его к полному разложению и образованию латерита (формула 2).



Гидролиз эфиров, обычно сопровождается образованием кислот и спиртов. (формула 3):



Однако, конкретные реакции гидролиза зависят от состава навоза и глины, а также от условий окружающей среды. Поэтому, чтобы определить возможные реакции с большей точностью, необходимо проанализировать конкретные образцы и провести эксперименты.

Гидролиз, который происходит при смешивании глины и навоза, может придавать следующие физические свойства смеси:



1. Изменение консистенции: Гидролиз может приводить к изменению текстуры смеси. Продукты гидролиза могут взаимодействовать с глиной, изменяя ее структуру и делая ее более пластичной или менее пластичной, в зависимости от условий.

2. Увлажнение: Гидролиз может способствовать подсушиванию смеси, так как процесс сопровождается потреблением воды. Это может быть полезным для обеспечения оптимальной влажности.

3. Изменение pH: Гидролиз могут изменять pH смеси.

Влияние гидролиза на физические свойства смеси из глины и навоза зависит от многих факторов, включая тип глины, состав навоза и условия гидролиза.

Если в навозе содержатся карбонаты, в частности кальция и магния, при взаимодействии с глиноземом в глине возможно образование различных соединений - гидросиликатов и карбонатов. Например, могут образовываться алюмосиликаты кальция и магния, $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ и $\text{Mg}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$, которые могут способствовать повышению устойчивости самана к влаге, кислотам, солям и другим вредным веществам, благодаря своим структурным свойствам.

При смешивании глины с навозом саман может приобрести несколько интересных свойств благодаря тому, что органические и неорганические компоненты образуют между собой комплексные соединения [42], [43]. Они могут способствовать увеличению влагоудерживающей способности. Это может быть полезным при строительстве, так как материал будет лучше сохранять влагу и обеспечивать естественную теплоизоляцию.

3.2 Property of adobe compressive strength

Саман обладает небольшой сжимаемостью и, при правильной обработке и армировании волокнами, может обладать достаточной прочностью для использования в строительных конструкциях.

Исследованию влияния типа волокна и их процентного содержания в саманной смеси на физико-механические свойства саманов уделяется особое внимание в литературе [44], [45], [46], [47], [48]. Однако представленные экспериментальные данные существенно различаются и часто приводят к противоречивым выводам. Например, в то время как некоторые исследователи сообщают об увеличении прочности при сжатии с увеличением содержания волокна [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55] другие сообщают о снижении этого важного механического свойства с увеличением содержания волокна [48], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62]. Учитывая отсутствие комплексного подхода к оценке влияния типа волокон и процентного содержания на свойства саманных кирпичей, как на международном, так и на местном уровне, очевидно, что требуются дальнейшие исследования для определения и предоставления соответствующей надежной базы данных по этой теме.

В исследовании [63] рассматривается влияние волокон красного проса на прочность глинобитных смесей при сжатии. Результаты экспериментальных испытаний механических характеристик подтверждают, что добавление 2% волокон проса в грунт саманного кирпича повышает прочность на сжатие. Кроме того, добавление 2–4% просяного волокна в грунт саманного кирпича обеспечивает более высокую прочность композита по сравнению с саманным кирпичом, изготовленным из чистого матричного грунта.

В исследовании [64] были изучены механические свойства самана при добавлении волокон морской травы в состав саманного кирпича. В результате экспериментальных испытаний сделан вывод о том, что прочность саманного кирпича как на сжатие улучшается благодаря добавлению волокон морской травы. Зафиксировано, что максимальная прочность саманного кирпича на сжатие составляет 2.672 МПа, что соответствует добавлению 1,5% морской травы, длина которой равна 3 см.

Исследование [65] сосредоточено на попытке улучшения механических свойств саманного кирпича с использованием псевдостеблевого волокна подорожника. Экспериментальные лабораторные испытания проводились с различным соотношением волокон 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75% и 1% в дополнение к сырцовому кирпичу. Средняя прочность на сжатие составляет 1.76 МПа, что соответствует 0.75% включению волокна с повышением прочности на сжатие на 33% по сравнению с чистой матрицей саманного кирпича.

Исследование [66] заключается в использовании волокон сизаля в качестве армирующего элемента для глинобитной кладки. Добавляется волокно длиной 25 мм в количестве 0.75%, и результаты экспериментов показывают прочность при сжатии призмы на 25% по сравнению с неармированным раствором.



За счет использования волокон из отходов бумаги и целлюлозы создаются легкие саманы с повышенной прочностью на сжатие [67]. Прочность на сжатие повышается до 190%.

Исследование [68] посвящено использованию волокон из промышленных отходов для производства саманного кирпича. Здесь при добавлении 60% промышленных отходов прочность на сжатие снижается.

При введении в саман портландцемента (ПЦ) и негашеной извести (НИ) (стабилизация) концентрация добавок положительно коррелирует с показателями прочности на сжатие. В работе [69] исследователи взяли одно из архитектурных наследий Алжира, и изучили различные смеси самана. Результаты показали, что стабилизация в целом улучшила свойства кирпича, в отличие от изменчивого воздействия волокон. Стабилизаторы сыграли важную роль в снижении ползучести, в то время как волокна снижали ползучесть нестабилизированных саманов и тех, которые содержат 6% ПЦ - 3% НИ, но сводили на нет положительный эффект, который давали связующие для самана с 10% НИ и 3% ПЦ - 6% НИ. Изменения характеристик ультразвукового сканирования показали хорошую корреляцию с показателями прочности при сжатии.

Исследование [1] сосредоточено на импровизациях на основе традиционных рецептов самана с учетом тенденции внедрения в смеси альтернативных переработанных материалов. В качестве сырья, как уже указывалось выше, вместо натуральной глины использовались отходы производства красного глиняного кирпича, а в качестве альтернативного связующего использовался известняковый порошок. Кроме того, в смесь был добавлен состав, обладающий способностью повышать прочность на сжатие. В этом случае прочность на сжатие была в пределах допустимых значений только для необработанного глиняного самана. В смесь добавлялись органические добавки для ускорения реакции пуццолана со связующими и песчаными материалами с участием воды. Для прогнозирования прочности на сжатие был проведен статистический регрессионный анализ (метод линейной регрессии). Корреляция между зависимыми и независимыми переменными была статистически незначимой из-за нелинейности экспериментов по сжатию.

В исследовании [33] прочность на сжатие измеряли при содержании золы соломы 0%, 5%, 10% и 20% и содержании гидроксида натрия 2.5%, 5%, 7.5% и 10% после отверждения композита в течение 28 дней. Результаты показали, что увеличение золы с 0% до 20% увеличило прочность на сжатие. Увеличение содержания гидроксида натрия с 2.5% до 10% также повысило прочность на сжатие. Наилучшие условия для оптимизации прочности композита на сжатие были при содержании 10% гидроксида натрия и 20% золы рисовой соломы. Рекомендуется использовать геополлимерный саманный кирпич с добавлением золы соломы риса для внутренних стен зданий, чтобы снизить теплопроводность, водопоглощение и вес кирпича.

В исследовании [70] изучили краткосрочные и долгосрочные характеристики саманного кирпича, содержащего пальмовые волокна с различным весовым соотношением грунта (от 0.25 до 1%). Для этого оценили показатели прочности образцов на сжатие, растяжение и пластичность, в то время как микроструктурные характеристики как волокон, так и образцов из самана исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Полученные результаты свидетельствуют о превосходных эксплуатационных характеристиках саманного кирпича, армированного волокнами, по сравнению с его неармированными аналогами. Кроме того, прочность саманного кирпича на растяжение повышается с увеличением содержания волокон, в то время как самая высокая прочность на сжатие наблюдается у образцов с содержанием волокон 0.25%.

Добавление натуральных волокон улучшает не только механические, но и тепловые характеристики саманного кирпича [71], [72]. В рамках работы [73] было проведено исследование по производству самана из донных отложений, извлеченных из гаваней Дюнкерк (Франция) и реки Усумацинта. Кирпичи изготавливались путем смешивания дюнкеркских отложений и насыщенной конопляной крошки. Процедура обработки осадков из Дюнкерка была применена и к осадкам реки Усумацинта для изготовления глинобитных (adobe), саманных, по сути, кирпичей с добавлением волокон цветков масличной пальмы. Были найдены характеристики осадков реки Усумацинта и волокна цветков пальмового масла для использования в адобовых кирпичях. Волокна цветков масличной пальмы нарезали ножевой мельницей с сеткой 2 см и сеткой 3 см. Лабораторное производство и испытания кирпича из отложений порта Дюнкерк и реки Усумацинта позволяют наблюдать за повышением ценности извлеченных из грунта отложений в глинобитных кирпичях с механической точки зрения. В этом исследовании были изучены и сравнены свойства кирпичей,



изготовленных как из портовых, так и из речных грунтовых отложений, и исследовано свойство прочности на сжатие.

Целью исследования [74] было изучение свойств саманного кирпича, стабилизированного отходами рисовой шелухи и известью. Эксперименты были проведены на саманных кирпичах размером $140 \times 100 \times 100$ мм³, приготовленных из почвы, 0.25%-1% отходов рисовой шелухи и 10% извести, чтобы провести всестороннюю оценку композитного материала. В ходе исследования было зафиксировано улучшение прочности на сжатие и растяжение на 62% и 95% соответственно при 28-дневном использовании отходов рисовой шелухи и стабилизированных известью строительных кирпичей по сравнению с нестабилизированными саманными кирпичами с содержанием рисовой шелухи 0.75%. Было обнаружено, что коэффициент впитывания саманного кирпича, стабилизированного рисовой шелухой и известью, на 13–60% выше, чем у нестабилизированного саманного кирпича. Саманный кирпич из рисовой шелухи с добавлением извести значительно улучшил характеристики сопротивляемости кирпича эрозии.

В настоящее время саманные дома с традиционными характеристиками по-прежнему широко используются в сельской местности на западе Китая, но их сейсмические характеристики относительно низкие, и они часто серьезно повреждаются при землетрясениях. Чтобы улучшить сейсмические характеристики традиционных саманных зданий при сохранении характеристик жилых зданий, в исследовании [75] были проверены механические свойства блоков из сжатого грунта, а характеристики микроструктуры после разрушения были проанализированы с помощью электронной микроскопии. На этой основе были спроектированы шесть образцов саманных стен, которые были испытаны методом квазистатического нагружения для исследования влияния основных колонн и различных типов кирпичей на характеристики сейсмостойкости зданий. Результаты показывают, что стержневая колонна может улучшить несущую способность и способность к сдвигу пустотелого самана, а также значительно увеличить несущую способность, способность рассеивать энергию и пластичность стены.

Повторное использование осадка водоочистных сооружений и золы-уноса для производства саманного кирпича является приемлемым подходом для практического применения благодаря многочисленным преимуществам, связанным с экономией строительных материалов и снижением загрязнения окружающей среды. В исследовании [76] шлам станции очистки подземных вод и зола-унос тепловой электростанции использовались в качестве альтернативных заполнителей для замены глины, традиционного компонента для производства кирпича. Основной целью данного исследования является производство саманного кирпича с использованием технологии гидравлического пресса. Оптимальный состав заполнителя был исследован путем определения прочности на сжатие в соответствии с национальным стандартом Вьетнама TCVN 6355: 1–2009. В качестве добавок и клеев использовались вспомогательные материалы, включая цемент, жидкое стекло и полипропиленовые волокна. Результаты показали, что кирпичное изделие с 2 отверстиями ($8 \times 4 \times 8$ см) прочностью 4.0 Мпа соответствует национальному стандарту качества TCVN 6477–2016. Кроме того, оптимальным соотношением был признан состав заполнителя (мас. %) в виде шлама: цемент: зола-унос: полипропиленовые волокна в соотношении 50: 35: 15: 0.5% на кубический метр смеси. Этот продукт обладает средней прочностью на сжатие, которая подходит для возведения стен или заборов на промышленных предприятиях или в домашних хозяйствах. Результаты, полученные в исследовании, демонстрируют перспективность подхода для кирпичной промышленности Вьетнама. Большое количество осадка может быть повторно использовано в качестве альтернативного материала для снижения цены продукта и сохранения природных ресурсов.

Лабораторные эксперименты в исследовании [34], включающие определение прочности на сжатие проведены на саманах, изготовленных из грунта и армированных двумя типами волокон: соломой и листьями с содержанием 0, 1, 2, 3 и 4%. Было обнаружено, что механические, термические и долговечные свойства саманов были глобально улучшены. Кроме того, волокна листьев нима вносят значительный вклад в комфортность термическую обработку, но их использование отрицательно сказывается на долговечности.

Таиланд сталкивается с серьезными проблемами загрязнения воды, особенно в природных водоемах, таких как реки и каналы. Широко распространенное растение водяной гиацинт препятствует проникновению кислорода в воду и его растворению в ней. Следовательно, использование водяного гиацинта в качестве строительных материалов может быть способом контроля распространения этого растения. Исследование [77] было сосредоточено на механических свойствах саманного кирпича при использовании водяного гиацинта в качестве



средства волокнистого армирования. Смесь саманного кирпича представляла собой комбинацию глины и песка в соотношении 1:1. В смесь саманного кирпича добавляют цемент в количестве 5%. Водяной гиацинт длиной 3 см, 5 см и 7 см смешали с образцами почвы в количестве 0.5%. Исследованы механические свойства саманного кирпича, включающие прочность на сжатие. Результаты показали, что прочность на изгиб глинобитных кирпичей, армированных водяным гиацинтом, может достигать 61–74% от прочности на сжатие. Однако прочность на изгиб неармированного саманного кирпича может достигать всего 17% от прочности на сжатие. Добавление водяного гиацинта в саманный кирпич может снизить вес изделия примерно на 20%. Более того, неармированные образцы разрушались после замачивания в воде в течение 24 часов.

В южных сельских районах деревни Хавасса, Эфиопия, строят дома из самана и методом «Chika-pet», который заключается в использовании глины, дерева и соломы для изготовления кирпичей. В строительстве домов используют землю, дерево и саманные кирпичи из соломы тефф из-за крайней бедности. Эти дома неустойчивы и непрочны из-за использования легко разлагаемого сырья, неинженерных методов строительства и низкой сейсмостойкости. Более того, почву, используемую для изготовления саманного кирпича, доставляют из отдаленных регионов, игнорируя родную почву Хавасса из-за ее неподходящих для производства кирпича характеристик. Это влияет на экономику домохозяйств жителей с низким доходом. Таким образом, исследование [78] провели с целью облегчить жизнь жителям деревни Хавасса путем улучшения характеристик их родной почвы за счет добавления извести. Для производства саманного кирпича используется альтернативное армирующее вещество из листьев ананаса, которое удовлетворительно повышает прочность на сжатие и растяжение в соответствии с требованиями Калифорнийского кодекса строительных стандартов. Максимальная прочность на сжатие зарегистрирована в 4.1 МПа, что в 6 раз больше, чем у обычных образцов, а прочность на изгиб зарегистрирована с улучшенным показателем в 0.78 Мпа. Это обеспечивает стандартное требование в соответствии с требованиями Калифорнийского строительного стандарта. В результате регистрируется устойчивая остаточная растягивающая нагрузка, что указывает на эффективное снижение пластичности кирпича.

В работе [4] исследуется влияние динамического уплотнения на механические свойства грунтов с использованием глинисто-илистых грунтов из города Ардакан, Йезд, Иран, с акцентом на прочность при сжатии в зависимости от гранулометрического состава грунта. Авторы обнаружили, что результаты механической стабилизации в том числе зависят и от минералогического состава. В связи с этим образцы самана в контрольной и экспериментальной (уплотненной) группах изготавливались из шести типов грунта шести различных шахт, были определены их физические, минералогические и химические характеристики. Исследованы прочности образцов на сжатие, растяжение и изгиб, а механическая прочность необожженного саманного кирпича была соотнесена с физическими свойствами грунтов. Лабораторные исследования подтвердили прямую взаимосвязь между динамическим уплотнением и механической прочностью. Результаты показали, что уплотнение грунта в экспериментальных саманах приводит к увеличению прочности при сжатии на 79.43%, прочности при растяжении на 42.42% и прочности при изгибе на 75.00% по сравнению с контрольными саманами, в которых отсутствует уплотнение. Таким образом, динамическое уплотнение является приемлемым методом для изготовления земляных материалов, таких как саман, в соответствии с требуемыми стандартами.

Глинобитные конструкции составляют заметную часть зданий как в городских, так и в сельских районах менее развитых стран. Сейсмические характеристики глинобитных зданий являются низкими, и для повышения устойчивости таких зданий во время землетрясения требуются экономически эффективные меры по модернизации. В исследовании [79] были изучены механические свойства армированной волокнами и неармированной глинобитной кладки. Волокна сизаля длиной 25 мм использовались в качестве армирующих элементов для строительного раствора и глинобитного кирпича при содержании волокон 0.75%. Была проведена серия лабораторных испытаний саманных тройников, муфт и призм для определения прочности на сдвиг, сопротивления растяжению и сжатия соответственно. Были проведены испытания на одноосное сжатие и диагональный сдвиг при сжатии для стеновых панелей и для определения прочности на сжатие и сдвиг кирпичной кладки. Конечно-элементный линейно-упругий анализ был проведен с использованием конечно-элементного кода ANSYS для оценки напряженного состояния нагруженных стеновых панелей. Конструктивное проектирование стен из саманной кладки было выполнено в соответствии со стандартами BS5628 и Eurocode 6 с использованием



свойств материала, полученных в результате экспериментов. Результаты показали, что включение волокон в строительный раствор привело к увеличению прочности при растяжении на 31%, коэффициента трения на 22% и прочности при сжатии на 25% по сравнению с неармированным строительным раствором. Было установлено, что допустимое сопротивление вертикальной нагрузке составляет 40 кН/м и 100 кН/м для неармированных и усиленных стен соответственно. Было установлено, что допустимое сопротивление боковому сдвигу составляет 25 кН/м и 80 кН/м для неармированных и усиленных стен соответственно. Усиленные элементы саманной кладки обладают значительной пластичностью, а неармированные элементы проявляют хрупкость.

Прочность на сжатие саманного кирпича исследованы в работе [36] Результаты показали, что смеси, содержащие паракаучуковый латекс и не содержащие кокосовую койру, обладают выдающимися свойствами по стойкости к растворению водой. Все образцы сохраняли форму после 28 дней погружения в воду. В то время как традиционная смесь и смеси с кокосовой стружкой растворялись в течение 24 часов. Кроме того, смесь с 15 процентами паракаучукового латекса обеспечивала самую высокую прочность на сжатие, которая составила 1.58 МПа по сравнению с 0.92 МПа у традиционного саманного кирпича. Можно сделать вывод, что паракаучуковый латекс может улучшить прочность саманного кирпича на сжатие.

При производстве саманных кирпичей используются различные типы растительных волокон для предотвращения образования трещин в процессе сушки. В Испании и во многих других странах волокном, обычно используемым при производстве саманных кирпичей, является солома зерновых культур, чаще всего пшеничная. Однако исследование [80] демонстрирует перспективность использования в качестве растительного волокна в саманной массе хвои трех видов сосен: *Pinus halepensis* (pn_1), *P. pinea* (pn_2) и *P. pinaster* (pn_3), все они распространены на Пиренейском полуострове. Полученные результаты показывают их способность, обеспечивать саману высокую прочность и пластичность

3.2.1 The influence of chemical processes on the strength properties of adobe

Глина обладает способностью взаимодействовать с ионами в растворе. При смешивании с навозом происходит обмен ионами между глиной и органическими веществами, что может привести к образованию новых соединений. Процессы обмена ионами при смешивании глины и навоза зависят от состава компонентов. Некоторые возможные реакции обмена ионами в самане приведены в формулах ниже; реакция ионного обмена между калийным ионом и ионом алюминия (формула 4), реакция ионного обмена между кальциевым ионом и ионом аммония (формула 5), реакция ионного обмена между магниевым ионом и ионом калия (формула 6), реакция ионного обмена между фосфатным ионом и ионом натрия (формула 7).



Обмен ионами может также способствовать формированию связей между глиной и органическими веществами, что приводит к повышению стабильности и прочности смеси.

Обжиг смеси из глины и навоза приводит к укреплению и фиксации частиц, что делает ее более прочной и стабильной. Таким образом, обжиг способствует улучшению физической прочности смеси и делает ее менее подверженной разрушению или сжатию. Также обжиг смеси глины и навоза при высоких температурах вызывает пиролиз органических составляющих навоза. При этом происходит превращение смеси в керамический материал, который обладает множеством полезных свойств, таких как высокая прочность, устойчивость к воде и улучшенная теплоизоляция.

Обмен ионами между глиной и органическими веществами в смеси из глины и навоза может оказать влияние на следующие физические свойства:

1. Улучшить катионную обменную емкость: Глина обладает высокой катионной обменной емкостью, что означает, что она может удерживать ионы полезных элементов питания, таких как калий, кальций и магний, а также ионы вредных элементов, таких как свинец и кадмий. Обмен



ионами между глиной и органическими веществами может увеличить катионную обменную емкость смеси, что обеспечивает прочность и устойчивость структуры.

2. Улучшить рыхлость и структуру: Обмен ионами может способствовать размягчению глин и улучшению их структуры. Это может привести к увеличению рыхлости смеси, что облегчает проникновение воды и воздуха, а также улучшает дренирование.

3. Улучшить водоудерживающую способность: Глина имеет хорошую водоудерживающую способность, а органические вещества могут усилить эту способность за счет образования структуры сгустков. Обмен ионами между глиной и органическими веществами может повышает способность смеси удерживать воду, что благоприятно влияет на микроклимат в помещении в регионах с жарким климатом.

4. Улучшить стабильность и прочность: Обмен ионами может также способствовать формированию связей между глиной и органическими веществами, что приводит к повышению стабильности и прочности смеси. Это может быть особенно полезно для удержания структуры почвы при интенсивном использовании и предотвращении эрозии почвы.

3.3 Thermal insulation as a property of adobe

Благодаря межмолекулярным воздушным пространствам саман обладает хорошими теплоизоляционными свойствами. Это помогает сохранять уровень комфорта внутри здания и снижает энергопотребление для отопления и охлаждения.

Тропический климат характеризуется высокой температурой, следствием чего является тепловой дискомфорт в помещении. Это объясняется высоким коэффициентом поглощения солнечной энергии различными элементами ограждающей конструкции здания, включая окна, стены и крышу. В попытке добиться теплового комфорта внутри помещений с минимальным использованием механических установок или вообще без них, в исследовании [81] сравнивали эффективность использования для решения этой задачи двух видов блоков кладки (саманный кирпич и полый блок из смешанного песчано-цементного раствора). Исследования проводили в районе Огбомосо, Нигерия. Методология включала в себя виртуальные модели двух похожих жилых зданий, каждое из которых состоит либо из саманного кирпича, либо из песчано-бетонных блоков в качестве элементов кладки. Эти модели были подвергнуты имитационному анализу энергетических характеристик с использованием программного обеспечения DesignBuilder в течение 12-месячного цикла, чтобы испытать круглогодичные дифференциальные тепловые условия. Благодаря наблюдаемым сравнительным годовым тепловым нагрузкам, полученным в моделях, результаты показывают улучшенный тепловой комфорт внутри саманного здания (т.е. 7119.54 кВт*ч), при этом тепловые нагрузки были на 11% ниже, чем в песчано-бетонном здании (т.е. 8875.65 кВт*ч) благодаря кирпичной облицовке стен. Это может быть связано с более низкой теплопроводностью саманного кирпича (U -значение), равной 1.798 Вт/м²-К, по сравнению со значением песчано-бетонных блоков, равным 1.999 Вт/м²-К. В целом, саманный кирпич в качестве стенового блока обладал большей термостойкостью к жарким погодным условиям, чем песчано-бетонные блоки.

В исследовании [33] теплопроводность самана измеряли при содержании золы рисовой соломы 0%, 5%, 10% и 20% и содержании гидроксида натрия 2.5%, 5%, 7.5% и 10% после отверждения композита в течение 28 дней. Результаты показали, что увеличение золы с 0% до 20% снизило теплопроводность.

Легкие саманные кирпичи были разработаны и приняты на вооружение в Новой Зеландии для обеспечения лучшей теплоизоляции в течение длительных периодов жары или холода. Экспериментальная кампания, описанная в исследовании [82], направлена на определение свойств материала в сравнение их с традиционными глинобитными стенами. Увеличенная масса самана в земляных зданиях благоприятствует тепловому комфорту в регионах с большими суточными колебаниями температуры, но это приводит и к тому, что эти здания испытывают высокую инерционную нагрузку в случае землетрясения, что представляет серьезную опасность для их обитателей.

Лабораторные эксперименты по добавлению волокон нима в качестве армирующего вещества в саман в исследовании [34], включающие определение теплопроводности, были проведены на саманных кирпичах, изготовленных из грунта и армированных двумя типами волокон (солома и листья) с содержанием 0, 1, 2, 3 и 4%. Было обнаружено, что термические свойства самана были глобально улучшены.



Технология строительства зданий с использованием глинистого грунта в различных формах, известная уже с древних времен, представляет собой большой потенциал для регулирования влажности в помещениях, снижения косвенного воздействия строительного сектора на окружающую среду и на потребление энергии. Также были проведены обширные исследования влияния натуральных волокон на механические и физические свойства композитных материалов с точки зрения прочности, энергоэффективности и ударопрочности. Эта работа сосредоточена на некоторых композициях из натуральных волокон, изготовленных из различных смесей, содержащих глинистую почву с различным процентным содержанием джутовых, соломенных и базальтовых волокон, с целью определения идеальной смеси между глиной и волокнами, обеспечивающей оптимальные значения тепловой инерции, механических характеристик и усадки, способные повысить энергоэффективность зданий. Были исследованы механические, физические и термические свойства некоторых образцов. Полученные результаты свидетельствуют о повышенной механической прочности и лучшей теплопроводности глиняного композиционного материала.

В исследовании [83] рассматривается качество тепловой массы ограждающих конструкций зданий как пассивное профилактическое явление для будущего потребления энергии. В работе ставится вопрос о том, сколько и какой тип тепловой массы требуется для снижения потребления энергии в соответствии с будущим изменением климата. Летние энергетические показатели саманного дома в Конье (Турция) изучаются с точки зрения тепломассовых характеристик с использованием программного обеспечения для динамического моделирования. Измеренные и прогнозируемые данные о микроклимате за 2017 и 2050-е годы используются для сравнения пассивного воздействия выбора материала стен, т.е. саман, известняк, вертикальный пустотелый кирпич и объем стены без вентиляции в ночное время. Исследование показывает, что тепловая масса с меньшей плотностью и более тонкими материалами демонстрирует более высокие энергетические показатели в летнее время. Потребление энергии минимально при вертикальной пустотелой кирпичной стене толщиной 50 см в 2017 году и 30 см в 2050-х годах. Сделан вывод, что теплопроводность по-прежнему будет оказывать большее влияние на потребление энергии, чем тепловая масса.

Исследования [84] показывают, что натуральные волокна могут значительно повысить энергоэффективность.

Работа сосредоточена на различных смесях натуральных волокон и глины, таких как джутовые, соломенные и базальтовые волокна. Целью исследования было определение оптимальное соотношение между глиной и волокнами, чтобы достичь лучших значений тепловой инерции, механических характеристик и усадки, которые могут значительно повысить энергоэффективность зданий. Исследователи изучили механические, физические и термические свойства образцов, и полученные результаты показали лучшую теплопроводность композитного материала из глины.

Таким образом, использование глины в сочетании с натуральными волокнами представляет собой перспективную технологию для создания энергоэффективных зданий.

3.3.1 The influence of chemical processes on the thermal insulation properties of adobe

Комплексы органических и неорганических соединений могут создать барьер для передачи тепла, что может привести к улучшению теплоизоляционных свойств самана [85], [86]. Это может помочь в поддержании комфортной температуры внутри сооружения.

Так как ферментация, происходящая в результате смешивания навоза и глины способна изменить структуру самана, то она напрямую влияет на плотность блока, следовательно и на теплоизоляцию. Ферментация может приводить к разрушению органических веществ в навозе, что может изменить структуру и состав смеси.

Влияние ферментации на физические свойства смеси из глины и навоза также зависит от типа ферментов, присутствующих в навозе, и условий ферментации. Окисление органических веществ также может оказывать влияние на физические свойства смеси из глины и навоза.

Даже анаэробная ферментация веществ в самане приводит к уменьшению объема (см. напр. формула 8).





Окисление органических веществ может привести к более интенсивному выделению газов, что может вызывать уменьшение объема смеси после выхода углекислоты в атмосферу (формула 9). Это ведет к сжатию смеси и повышению теплоизоляции.

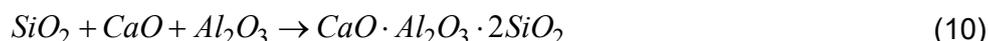


Окисление органических веществ может вызывать разрушение связей между частицами глины и навоза. Это может привести к изменению структуры смеси и возможно, улучшить ее рыхлость и воздухопроницаемость.

Влияние окисления органических веществ на физические свойства смеси из глины и навоза также зависит от типа органических веществ, присутствующих в навозе, и условий окисления.

Обмен ионами (формулы 4–7) может способствовать размягчению глин и улучшению их структуры. Это может привести к увеличению рыхлости смеси, что облегчает проникновение воды и воздуха, тем самым понижая теплоизоляцию.

Обжиг смеси из глины и навоза приводит к укреплению частиц, что делает ее более прочной и стабильной. В том числе при обжиге происходит реакция образования стеклообразных соединений (формула 10), которая помимо прочности и стабильности наделяет саман свойством повышенной теплоизоляции.



В результате обжига происходит разложение органического вещества, окисление углерода и трансформация неорганических компонентов, таких как глина, в различные соединения.

Обжиг смеси глины и навоза при высоких температурах вызывает пиролиз органических составляющих навоза. При этом происходит превращение смеси в керамический материал через образование алюмосиликатов (формула 11).



и стеклообразных соединений (формула 10).

Керамический материал обладает множеством полезных свойств, таких как высокая прочность и улучшенная теплоизоляция.

Обжиг может привести к уменьшению объема и плотности смеси из-за выгорания органических веществ. Поскольку плотность смеси уменьшается, межмолекулярные расстояния увеличиваются, что снижает теплообмен между молекулами. Это значит, что тепло будет передаваться медленнее. Однако стоит учесть, что уменьшение объема и плотности самана также может привести к увеличению его проводимости тепла. Поскольку материал становится менее плотным, внутренний объем с изоляционными свойствами может сократиться, что позволяет теплу более эффективно проникать через него. В данном случае, потеря объема и плотности самана может отрицательно повлиять на его способность сохранять тепло. Таким образом, обжиг самана с последующим выгоранием органических веществ может привести к уменьшению объема и плотности смеси, что влияет на процесс теплообмена. В итоге это может сказаться на свойствах теплоизоляции или передаче тепла через материал.

Эти реакции являются лишь примерами того, что может происходить в процессе превращения смеси навоза и глины в керамику. Другие химические реакции и превращения также могут иметь место, в зависимости от конкретного состава смеси и условий обжига.

3.4 Durability as a property of adobe

В исследовании [34], проведенном на саманах, изготовленных из грунта и армированных двумя типами волокон; соломой и листьями было обнаружено, что долговечность самана была улучшена добавлением соломы, но волокна листьев повлияли отрицательно.

В исследовании [87] были синтезированы и оценены четыре различных уплотнителя для обработки глинобитных зданий. Материалы из саманного кирпича, протестированные на нескольких шахтерских гасиендах семнадцатого и восемнадцатого веков, расположенных в Гуанахуато (Мексика); были охарактеризованы с помощью рентгеноструктурного анализа, гранулометрии, пористости, содержания влаги и механической стойкости. Были синтезированы четыре отвердителя на основе тетраэтоксисиликата (Tetraethyl orthosilicate или TEOS) (F₁), составы с наночастицами диоксида кремния (F₂), TEOS с гидроксидом полидиметилсилоксаном (Polydimethylsiloxane или PDMS-OH) (F₃) и гибридный отвердитель, образованный TEOS, полидиметилсилоксан (Polydimethylsiloxane или PDMS) и наночастицами диоксида кремния (F₄). Герметики были протестированы и оценены по долговечности. Результаты показывают, что



коллоидный диоксид кремния улучшает пористость гелей TEOS, а PDMS улучшает гибкость геля TEOS, предотвращая образование трещин. Таким образом, добавление обоих компонентов в TEOS gel обеспечивает превосходную закрепляющую обработку самана.

В исследовании [88] описывается работа, проведенная с целью определения традиционного и стабилизированного состава самана, а также для дальнейшего уточнения подходящего выбора состава покрытия для увеличения долговечности этих конструкций. Постройки в З'Гег-эль-Хаджадже (город Лагуат, Алжир) состоят из глинобитных стен, а также штукатурки, которая служит покрытием для этих кирпичных стен. Явления разрушения здания учитываются при нанесении саманного покрытия и, следовательно, при выборе их составов. Совместимость штукатурок с цементными растворами остается основным фактором при реставрации. В данной статье рассматриваются результаты экспериментальной характеристики свойств кирпича с покрытием, которая заключается в лабораторном изучении водостойкости. Делали тест на высыхание-увлажнение и тест на подъем воды по капиллярам, а также дополнительный тест на ускоренное старение: тест на истирание. Сопоставление результатов исследования привело к выводу о том, что при испытаниях на капиллярное поглощение и адгезию, однородное покрытие в 3 слоя наделяет саман большей прочностью и долговечностью путем повышения сцепления веществ в составе самана.

3.4.1 The influence of chemical processes on the durability property of adobe

Правильно выполненный саманный кирпич может быть долговечным и устойчивым к различным внешним факторам, таким как погодные условия и воздействие времени.

Частицы глины и навоза могут образовывать межмолекулярные связи, такие как взаимодействия ван-дер-Ваальса и/или водородные связи. Это позволяет частицам сцепляться вместе и укреплять структуру кирпича.

Некоторые компоненты глины и навоза могут взаимодействовать и образовывать новые минеральные соединения. Например, глина может содержать глинозем, который может реагировать с минералами в навозе, такими как кальций и магний, и образовывать различные гидросиликаты. Эти новые соединения повышают устойчивость и прочность кирпича.

Органические компоненты в навозе могут вступать в химические реакции с частичками глины, образуя новые связи. Это может произойти, например, за счет образования карбоксильных групп и образования новых комплексов.

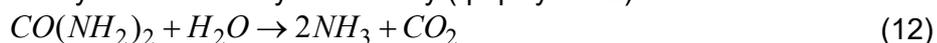
Если в навозе присутствуют карбонаты кальция и магния, и они вступают в реакцию с глиноземом в глине, могут образовываться различные гидросиликаты и карбонаты. Например, могут образоваться кальциевые и магниевые алюмосиликаты, обозначаемые как $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ и $\text{Mg}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$.

Карбонаты могут повысить механические свойства самана, такие как прочность и упругость, что делает его более устойчивым к разрушению и деформации.

Саман, образующийся при смешивании глины и навоза, может приобрести ряд свойств в результате образования комплексных соединений между органическими и неорганическими компонентами. Образование комплексов между органическими и неорганическими компонентами может повысить устойчивость самана к воздействию насекомых, гниения и некоторых других разрушительных факторов.

3.5 The role of biological processes in adobe technology

Важным аспектом технологии самана, слабо разработанным в специальной литературе, является роль биологических процессов. Бактерии, попадающие в сырье для самана в основном с навозом сельскохозяйственных животных, вырабатывают фермент уреазу, который разлагает присутствующую в навозе мочевины на аммиак и уголекислоту (формула 12).



Уголекислота, реагируя с ионами кальция образует малорастворимый карбонат кальция [89] (формула 13).



Вышеназванные реакции лежат в основе процесса биоцементирования, благодаря которому, например, авторам работы [90] без добавления цемента удалось получать саманные кирпичи с прочностью на сжатие 3000 кПа и поглощением воды 8.5% соответственно. Лучшие результаты были получены с использованием бактерий, выделенных из исторических саманных

Kirsanova, T.; Chistyakov, V.; Hamid, R.; Vdovchenkov, E.; Aramova, O.; Alliluyeva, E.

Overview of developments in the field of adobe bricks;

2024; AlfaBuild; 31 Article No 3105. doi: 10.57728/ALF.31.5



сооружений, расположенных в Республике Иран. Таким образом саман является, подобно почве, биокосной системой. Благодаря эксплуатации активности биологической составляющей технологии саманных кирпичей оказались доступны древним цивилизациям, не имевшим мощных источников энергии. Однако технология строительных материалов пришла к ситуации, когда биологические препараты начинают активно внедряться для производства бетона, который приобретает при этом способность к регенерации мелких повреждений [91]. Таким образом, бактерии, выделенные из самана, а также знания, полученные при изучении этого древнейшего строительного материала, могут быть использованы для создания инновационных строительных материалов с уникальными свойствами.

4 Conclusions

Научные исследования в области применения биологических и армирующих компонентов в технологии самана представлены ограниченно и слабо изучены за последние 5 лет. Анализ исследований в международной базе данных позволяет выявить актуальность изучения технологии самана в том числе и с точки зрения биологических процессов и их влияния на строительный материал.

Добавление армирующих материалов и использование новых связующих веществ является основным способом улучшения качества саманного кирпича, его механических и физических свойств. Исследования, связанные с влагоёмкостью саманного кирпича, его прочностью на сжатие, теплоизоляционными свойствами и долговечностью, имеют важное значение для определения потенциала и пределов применения данного материала. Потенциальные проблемы и ограничения, связанные с использованием саманного кирпича, требуют дальнейшего изучения и решения, включая его восприимчивость к влажности, защиту от гниения и возможные проблемы с огнестойкостью. Дальнейшие исследования по использованию химических и армирующих компонентов при производстве саманного кирпича будут важны для расширения знаний в этой области и определения потенциала и ограничений данного материала для строительных проектов.

При взаимодействии глины и навоза с водой происходит гидролиз, в результате которого органические и неорганические соединения разлагаются и образуются новые вещества. Некоторые из этих реакций могут приводить к изменениям в физических свойствах смеси глины и навоза. Например, гидролиз органических соединений может изменять консистенцию смеси и влажность, а гидролиз неорганических соединений может менять pH-баланс. Кроме того, при наличии карбонатов в навозе, взаимодействие с глиной может приводить к образованию новых соединений, таких как алюмосиликаты кальция и магния. Эти соединения могут повысить устойчивость самана к влаге, кислотам и другим вредным веществам. Таким образом, смесь глины и навоза может приобрести интересные свойства, такие как повышенная влагоудерживающая способность и лучшая изоляция. Эти свойства могут быть полезными при использовании самана в строительстве.

Органические и неорганические вещества, попадающие в саман вместе с глиной и навозом могут вступать в процессы обмена ионами между собой. Эти процессы приводят к образованию новых соединений, укреплению и фиксации частиц, а также трансформации смеси в керамический материал, что в свою очередь улучшает физические свойства смеси, такие как катионная обменная емкость, рыхлость, водоудерживающая способность, стабильность и прочность. Эти свойства могут быть полезными для предотвращения эрозии и обеспечения устойчивости при использовании смеси глины и навоза в строительстве.

Реакции, возникающие между органическими и неорганическими соединениями в самане, могут улучшить теплоизоляционные свойства строительного материала. Ферментация и окисление органических веществ влияют на физические свойства саманной смеси, изменяя ее структуру и плотность, что может привести к повышению показателей теплоизоляции. Обмен ионами и обжиг также играют роль в формировании керамического материала, который имеет прочность и улучшенную теплоизоляцию. Различные химические реакции и превращения влияют на процесс превращения смеси в керамику. Чтобы достичь наилучших результатов, необходимо учитывать состав смеси и условия обжига.

В результате взаимодействия органических и неорганических веществ в смеси глины и навоза формируется барьер, который снижает передачу тепла и повышает теплоизоляцию самана. Ферментация навоза, а также окисление органических веществ влияют на физические



свойства смеси, изменяя ее плотность и структуру. Это может привести к повышению воздухопроницаемости, что положительно сказывается на теплоизоляции. Ионный обмен и обжиг влияют на формирование керамического материала, который обладает высокой прочностью и улучшенными свойствами теплоизоляции. На физические свойства смеси влияют реакции ферментации и окисления органических веществ, а параметры обжига определяют структуру и состав конечного материала. Поэтому контроль состава смеси и условий обработки могут помочь достичь наилучших результатов в улучшении теплоизоляции самана.

Способность самана к поглощению и выделению влаги позволяет ему регулировать влажность внутри здания, что полезно в жарком и влажном климате. Однако, в сыром климате или при недостаточной обработке материала, влага может стать проблемой и привести к разрушению кирпича и появлению плесени и гниения. Недостаточная вентиляция может поддерживать высокую влажность внутри помещений, что также может вызывать конденсацию, плесень и проблемы со здоровьем. Поэтому важно принимать меры по обработке и защите саманного кирпича, а также обеспечивать хорошую вентиляцию помещений. В зимний период в прибрежных зонах с повышенной влажностью воздуха требуется уменьшение влагопоглощающих свойств самана. Исследования по добавлению различных связующих и усиливающих материалов, таких как портландцемент и волокна, проводятся для улучшения свойств саманного кирпича. В дополнение, исследования по использованию переработанных материалов и геополимеров также проводятся для улучшения водопоглощения саманного кирпича.

Несмотря на улучшение свойств, саманный кирпич все еще имеет ограничения в конструктивных возможностях. Он может быть ограничен в применении для определенных типов и размеров строений или требований строительных стандартов. Саманный кирпич может иметь неоднородную структуру, что может приводить к различиям в его теплоизоляционных свойствах. Это требует более детального изучения и оптимизации процесса изготовления.

В тропическом климате, характеризующемся высокой температурой, саманный кирпич может сталкиваться с ограничениями в поддержании комфортного уровня внутри здания. Это связано с высокой способностью различных элементов ограждающей конструкции здания поглощать солнечную энергию. Однако саманный кирпич может помочь снизить тепловое дискомфорт благодаря своим теплоизоляционным свойствам. Оптимизация теплоизоляционных свойств саманного кирпича может потребовать добавления различных веществ, таких как зола рисовой соломы и гидроксид натрия. Однако увеличение содержания золы может привести к снижению теплопроводности и улучшению теплоизоляционных свойств.

Увеличение массы саманного кирпича может быть благоприятным для теплового комфорта в условиях суточных колебаний температуры. Однако это может привести к увеличению инерционной нагрузки и представлять опасность в случае землетрясений.

Добавление армирующих волокон, таких как солома и листья нима, может улучшить термические свойства саманного кирпича. Однако необходимо провести дальнейшие эксперименты и исследования для определения оптимальных типов и содержания волокон.

Необходимо отметить, что эти проблемы и ограничения могут быть преодолены с помощью дальнейшего исследования, оптимизации процесса изготовления и использования дополнительных материалов и веществ для улучшения свойств саманного кирпича.

В ходе обзора был решен ряд задач:

1. Проведено подробное описание методологии исследования поиска литературы, систематизированы актуальные мировые исследования по применению саманного кирпича в строительстве;
2. проведен обзор существующих исследований, касающихся: а) свойства влагоёмкости саманного кирпича и его потенциала; б) свойства прочности на сжатие саманного кирпича и его потенциала; в) теплоизоляционных свойств саманного кирпича и его потенциала; г) свойства долговечности саманного кирпича.
3. рассмотрено влияние химических процессов на свойства: а) влагопоглощения; б) прочности; в) теплоизоляции; г) долговечности;
4. выявлены потенциальные проблемы и ограничения, связанные с использованием саманного кирпича, сделаны выводы и предложены рекомендации для дальнейших исследований и применения саманного кирпича в строительстве;
5. рассмотрена роль биологических процессов в технологии строительства из саманного кирпича.



Саманный кирпич прошел долгий путь эволюции, начиная с древности и до наших дней. Он был одним из первых материалов, используемых для строительства, и в то время состоял из глины, песка, навоза и других органических компонентов. В средние века техники изготовления кирпича продолжали развиваться в сторону добавления новых материалов для улучшения прочности и устойчивости.

Использование натуральных материалов с теплоизоляционными свойствами становится все более популярным, а методы производства позволяют создавать саманный кирпич с превосходными характеристиками. Саманный кирпич имеет большой потенциал для применения в строительстве с учетом появления новых технологий и исследовательской работы, он может продолжить эволюционировать и стать усовершенствованным в результате контроля и манипуляциями химическими процессами и молекулярными взаимодействиями.

Одним из важных аспектов технологии самана с недостаточной разработкой в специальной литературе является роль биологических процессов. Особый интерес вызывает выработка бактериями фермента уреазы, которая разлагает присутствующую в смеси из глины и навоза мочевины на аммиак и углекислоту. При взаимодействии углекислоты с ионами кальция образуется малорастворимый карбонат кальция. Данные реакции лежат в основе процесса биоцементирования. С учетом технологии строительных материалов, которая активно начинает использовать биологические препараты для производства бетона с возможностью регенерации, актуальным является проведение дополнительных исследований в области влияния биологических процессов на технологию бетонного строительства.

Таким образом, саман является интересным и перспективным материалом для строительства, а технология самана объединяет в себе биологические и технологические аспекты.

References

- 1 Kumanan, T.S. and Sofi, A. (2023) Investigation of the Stability of Recycled Clay Adobes by Statistical Regression Analysis – A Preliminary Study. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.453>.
- 2 Hu, W., Liu, X., Fang, S., Chen, X., Gu, W. and Wei, Q. (2022) Research on the Building Materials of Adobe House in the Neolithic Period at the Qingtai Site, China. *Archaeometry*, **64**, 1411–1425. <https://doi.org/10.1111/arcm.12783>.
- 3 Erol, F., Tavukçuoğlu, A. and Saltik, E.N.C. (2022) Technological Properties of Adobe Building Materials Belonging to Neolithic Period: Ulucak Höyük Settlement, IOzmir | Neolitik Dönem Kerpiç Yapi Malzemelerinin Teknolojik Özellikleri: Ulucak Höyük Yerleşimi, Izmir. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **37**, 1595–1608. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.947185>.
- 4 Dormohamadi, M. and Rahimnia, R. (2020) Combined Effect of Compaction and Clay Content on the Mechanical Properties of Adobe Brick. *Case Studies in Construction Materials*, **13**. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00402>.
- 5 Khodr, M., Law, D.W., Gunasekara, C., Setunge, S. and Brkljaca, R. (2020) Compressive Strength and Microstructure Evolution of Low Calcium Brown Coal Fly Ash-Based Geopolymer. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Taylor and Francis Ltd., **9**, 17–34. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1666061>.
- 6 Kubiś, M., Pietrak, K., Furmański, P., Wasik, M., Seredyński, M., Wiśniewski, T.S. and Łapka, P. (2020) On the Anisotropy of Thermal Conductivity in Ceramic Bricks. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **31**. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101418>.
- 7 Kurmus, H. and Mohajerani, A. (2021) Energy Savings, Thermal Conductivity, Micro and Macro Structural Analysis of Fired Clay Bricks Incorporating Cigarette Butts. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **283**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122755>.
- 8 Morsy, M.I. and Mohamed, H.H. (2018) Experimental Investigation on Some Parameters of Rice Straw Ash - Fly Ash Geopolymer Mortar. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, Misr Society of Agricultural Engineering (MSAE), **35**, 1083–1098. <https://doi.org/10.21608/mjae.2018.95603>.
- 9 Nan, Q., wang, C., Yi, Q., Zhang, L., Ping, F., Thies, J.E. and Wu, W. (2020) Biochar Amendment Pyrolysed with Rice Straw Increases Rice Production and Mitigates Methane Emission over Successive Three Years. *Waste Management*, Elsevier Ltd, **118**, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.013>.
- 10 Nanayakkara, O., Gunasekara, C., Sandanayake, M., Law, D.W., Nguyen, K., Xia, J. and Setunge, Kirsanova, T.; Chistyakov, V.; Hamid, R.; Vdovchenkov, E.; Aramova, O.; Alliluyeva, E. Overview of developments in the field of adobe bricks; 2024; AlfaBuild; **31** Article No 3105. doi: 10.57728/ALF.31.5



- S. (2021) Alkali Activated Slag Concrete Incorporating Recycled Aggregate Concrete: Long Term Performance and Sustainability Aspect. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **271**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121512>.
- 11 Tome, S., Bewa, C.N., Nana, A., Nemaleu, J.G.D., Etoh, M.A., Tchakouté, H.K., Kumar, S. and Etame, J. (2021) Structural and Physico-mechanical Investigations of Mine Tailing-Calcined Kaolinite Based Phosphate Geopolymer Binder. *Silicon*, **16**, 1–8. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85128577350&partnerID=40&md5=b63a7df29ffdceb56adbe2e22f14f3fa>.
- 12 Hassan, A., Arif, M. and Shariq, M. (2019) Use of Geopolymer Concrete for a Cleaner and Sustainable Environment – A Review of Mechanical Properties and Microstructure. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, **223**, 704–728. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.051>.
- 13 Lahoti, M., Tan, K.H. and Yang, E.-H. (2019) A Critical Review of Geopolymer Properties for Structural Fire-Resistance Applications. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **221**, 514–526. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.076>.
- 14 Jia, L., He, P., Jia, D., Fu, S., Wang, M., Wang, M., Duan, X., Yang, Z. and Zhou, Y. (2020) Immobilization Behavior of Sr in Geopolymer and Its Ceramic Product. *Journal of the American Ceramic Society*, Blackwell Publishing Inc., **103**, 1372–1384. <https://doi.org/10.1111/jace.16811>.
- 15 Reeb, C., Pierlot, C., Davy, C. and Lambertin, D. (2021) Incorporation of Organic Liquids into Geopolymer Materials - A Review of Processing, Properties and Applications. *Ceramics International*, Elsevier Ltd, **47**, 7369–7385. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.239>.
- 16 Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C. and Meida, L.O. (2001) Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, **26**, 303–329. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>.
- 17 Liu, X., Nair, S., Aughenbaugh, K. and van Oort, E. (2019) Mud-to-Cement Conversion of Non-Aqueous Drilling Fluids Using Alkali-Activated Fly Ash. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier B.V., **182**. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106242>.
- 18 Davy, C.A., Hauss, G., Planel, B. and Lambertin, D. (2019) 3D Structure of Oil Droplets in Hardened Geopolymer Emulsions. *Journal of the American Ceramic Society*, Blackwell Publishing Inc., **102**, 949–954. <https://doi.org/10.1111/jace.16142>.
- 19 Shi, C., Qu, B. and Provis, J.L. (2019) Recent Progress in Low-Carbon Binders. *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, **122**, 227–250. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.009>.
- 20 Costa, C., Medronho, B., Filipe, A., Mira, I., Lindman, B., Edlund, H. and Norgren, M. (2019) Emulsion Formation and Stabilization by Biomolecules: The Leading Role of Cellulose. *Polymers*, MDPI AG, **11**. <https://doi.org/10.3390/polym11101570>.
- 21 Andrew, R.M. (2019) Global CO₂ Emissions from Cement Production, 1928-2018. *Earth System Science Data*, Copernicus GmbH, **11**, 1675–1710. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>.
- 22 Naqi, A. and Jang, J.G. (2019) Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review. *Sustainability (Switzerland)*, MDPI, **11**. <https://doi.org/10.3390/su11020537>.
- 23 Scrivener, K.L., John, V.M. and Gartner, E.M. (2018) Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a Low-CO₂ Cement-Based Materials Industry. *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, **114**, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- 24 Ranjbar, N. and Zhang, M. (2020) Fiber-Reinforced Geopolymer Composites: A Review. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier Ltd, **107**. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498>.
- 25 Azevedo, A.R.G., Vieira, C.M.F., Ferreira, W.M., Faria, K.C.P., Pedroti, L.G. and Mendes, B.C. (2020) Potential Use of Ceramic Waste as Precursor in the Geopolymerization Reaction for the Production of Ceramic Roof Tiles. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **29**. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101156>.
- 26 Caratenuto, A., Xie, L., Gu, L., Tian, Y., Liu, X., Wang, C., Su, M. and Zheng, Y. (2023) Adobe Bricks as Zero-Material-Cost Solar Evaporators for Water-Scarce Regions. *Desalination*, **546**. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116199>.
- 27 Novais, R.M., Pullar, R.C. and Labrincha, J.A. (2020) Geopolymer Foams: An Overview of Recent Advancements. *Progress in Materials Science*, Elsevier Ltd, **109**. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100621>.
- 28 Tan, T.H., Mo, K.H., Ling, T.-C. and Lai, S.H. (2020) Current Development of Geopolymer as Alternative Adsorbent for Heavy Metal Removal. *Environmental Technology and Innovation*,



- Elsevier B.V., **18**. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100684>.
- 29 Farhan, K.Z., Johari, M.A.M. and Demirboğa, R. (2020) Assessment of Important Parameters Involved in the Synthesis of Geopolymer Composites: A Review. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **264**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120276>.
- 30 Rožek, P., Król, M. and Mozgawa, W. (2019) Geopolymer-Zeolite Composites: A Review. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, **230**, 557–579. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.152>.
- 31 Pei, Y.-R., Choi, G., Asahina, S., Yang, J.-H., Vinu, A. and Choy, J.-H. (2019) A Novel Geopolymer Route to Porous Carbon: High CO₂ Adsorption Capacity. *Chemical Communications*, Royal Society of Chemistry, **55**, 3266–3269. <https://doi.org/10.1039/c9cc00232d>.
- 32 Zhang, Y.J., Han, Z.C., He, P.Y. and Chen, H. (2020) Geopolymer-Based Catalysts for Cost-Effective Environmental Governance: A Review Based on Source Control and End-of-Pipe Treatment. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, **263**. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121556>.
- 33 Morsy, M.I., Alakeel, K.A., Ahmed, A.E., Abbas, A.M., Omara, A.I., Abdelsalam, N.R. and Emaish, H.H. (2022) Recycling Rice Straw Ash to Produce Low Thermal Conductivity and Moisture-Resistant Geopolymer Adobe Bricks. *Saudi Journal of Biological Sciences*, **29**, 3759–3771. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.046>.
- 34 Babé, C., Kidmo, D.K., Tom, A., Mvondo, R.R.N., Kola, B. and Djongyang, N. (2021) Effect of Neem (*Azadirachta Indica*) Fibers on Mechanical, Thermal and Durability Properties of Adobe Bricks. *Energy Reports*, **7**, 686–698. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.085>.
- 35 de Castrillo, M.C., Ioannou, I. and Philokyrou, M. (2021) Reproduction of Traditional Adobes Using Varying Percentage Contents of Straw and Sawdust. *Construction and Building Materials*, **294**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123516>.
- 36 Wongpa, J. and Thongsanitgarn, P. (2018) Effect of Para Rubber Latex and Coir on Compressive Strength, Water Absorption and Volumetric Change of Adobe Brick. *International Journal of Agricultural Technology*, **14**, 2229–2240.
- 37 Bourgès, A. and Simon, S. (2018) CEC Input to Evaluate the Butyl Diammonium Dichloride as a Swelling Reducer in Clay Rich Material. *Applied Clay Science*, **152**, 352–356. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.016>.
- 38 Phuong, P.-T.H., Nghiem, T.-D., Thao, P.-T.M., Pham, C.-T., Thi, T.-T. and Thanh Dien, N. (2021) Impact of Rice Straw Open Burning on Local Air Quality in the Mekong Delta of Vietnam. *Atmospheric Pollution Research*, Elsevier B.V., **12**. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101225>.
- 39 Tai, W., He, L., Zhang, X., Pu, J., Voronin, D., Jiang, S., Zhou, Y. and Du, L. (2020) Characterization of the Receptor-Binding Domain (RBD) of 2019 Novel Coronavirus: Implication for Development of RBD Protein as a Viral Attachment Inhibitor and Vaccine. *Cellular and Molecular Immunology*, Springer Nature, **17**, 613–620. <https://doi.org/10.1038/s41423-020-0400-4>.
- 40 Yusuf, A.A., Inambao, F.L., Hassan, A.S., Nura, S.S. and Karthickeyan, V. (2020) Comparative Study on Pyrolysis and Combustion Behavior of Untreated Matooke Biomass Wastes in East Africa via TGA, SEM, and EDXS. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, **11**, 265–273. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00331-2>.
- 41 Zhang, X., Bai, C., Qiao, Y., Wang, X., Jia, D., Li, H. and Colombo, P. (2021) Porous Geopolymer Composites: A Review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Elsevier Ltd, **150**. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106629>.
- 42 Jiang, C., Wang, A., Bao, X., Ni, T. and Ling, J. (2020) A Review on Geopolymer in Potential Coating Application: Materials, Preparation and Basic Properties. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **32**. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101734>.
- 43 Xu, M.-X., He, Y., Zhang, Z.-W., Chen, X.-L. and Cui, X.-M. (2020) Preparation of Geopolymer-Based Porous Filter Using the Quartz Sand Compact Method. *Journal of Porous Materials*, Springer, **27**, 863–874. <https://doi.org/10.1007/s10934-019-00844-5>.
- 44 Araya-Letelier, G., Concha-Riedel, J., Antico, F.C., Valdés, C. and Cáceres, G. (2018) Influence of Natural Fiber Dosage and Length on Adobe Mixes Damage-Mechanical Behavior. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **174**, 645–655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.151>.
- 45 Araya-Letelier, G., Concha-Riedel, J., Antico, F.C. and Sandoval, C. (2019) Experimental Mechanical-Damage Assessment of Earthen Mixes Reinforced with Micro Polypropylene Fibers.



- Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **198**, 762–776. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.261>.
- 46 Calatan, G., Hegyi, A., Dico, C. and Mircea, C. (2016) Determining the optimum addition of vegetable materials in adobe bricks. *Procedia Technol.*, **22**, 259–265. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85014044658&partnerID=40&md5=c53aaad309830085b1348cefc19f0bb4>.
- 47 Jové-Sandoval, F., Barbero-Barrera, M.M. and Flores Medina, N. (2018) Assessment of the Mechanical Performance of Three Varieties of Pine Needles as Natural Reinforcement of Adobe. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **187**, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.187>.
- 48 Masuka, S., Gwenzi, W. and Rukuni, T. (2018) Development, Engineering Properties and Potential Applications of Unfired Earth Bricks Reinforced by Coal Fly Ash, Lime and Wood Aggregates. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **18**, 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.03.010>.
- 49 Giroudon, M., Laborel-Préneron, A., Aubert, J.-E. and Magniont, C. (2019) Comparison of Barley and Lavender Straws as Bioaggregates in Earth Bricks. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **202**, 254–265. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.126>.
- 50 Costa, C., Cerqueira, Â., Rocha, F. and Velosa, A. (2019) The Sustainability of Adobe Construction: Past to Future. *International Journal of Architectural Heritage*, Taylor and Francis Inc., **13**, 639–647. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1459954>.
- 51 Lamrani, M., Mansour, M., Laaroussi, N. and Khalfaoui, M. (2019) Thermal Study of Clay Bricks Reinforced by Three Ecological Materials in South of Morocco. In: Bevrani, H., Ed., *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 273–277. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.141>.
- 52 Abdeldjalil, M. and Yousfi, S. (2020) Identification of Sands of Dune and Concretes Using a Granular Model - Case of Arid Region -. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier Ltd, **13**. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00458>.
- 53 Capson-Tojo, G., Moscoviz, R., Astals, S., Robles, Á. and Steyer, J.-P. (2020) Unraveling the Literature Chaos around Free Ammonia Inhibition in Anaerobic Digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, **117**. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109487>.
- 54 El-Sayed, T.A. and Shaheen, Y.B.I. (2020) Flexural Performance of Recycled Wheat Straw Ash-Based Geopolymer RC Beams and Containing Recycled Steel Fiber. *Structures*, Elsevier Ltd, **28**, 1713–1728. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.013>.
- 55 Gunasekara, C., Setunge, S., Law, D.W., Willis, N. and Burt, T. (2018) Engineering Properties of Geopolymer Aggregate Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), **30**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002501](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002501).
- 56 Rodríguez-Mariscal, J.D., Solís, M. and Cifuentes, H. (2018) Methodological Issues for the Mechanical Characterization of Unfired Earth Bricks. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **175**, 804–814. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.118>.
- 57 Sathiparan, N. and De Zoysa, H.T.S.M. (2018) The Effects of Using Agricultural Waste as Partial Substitute for Sand in Cement Blocks. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **19**, 216–227. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.04.023>.
- 58 Laborel-Préneron, A., Magniont, C. and Aubert, J.-E. (2018) Hygrothermal Properties of Unfired Earth Bricks: Effect of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob Addition. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **178**, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021>.
- 59 Allam, R., Issaadi, N., Belarbi, R., El-Meligy, M. and Altahrany, A. (2018) Hygrothermal Behavior for a Clay Brick Wall. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, Springer Verlag, **54**, 1579–1591. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2271-5>.
- 60 El Azhary, K., Raefat, S., Laaroussi, N. and Garoum, M. (2018) Energy Performance and Thermal Properties of Three Types of Unfired Clay Bricks. In: Valtere, S., Ed., *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 495–502. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.059>.
- 61 Hany, E., Fouad, N., Abdel-Wahab, M. and Sadek, E. (2021) Investigating the Mechanical and Thermal Properties of Compressed Earth Bricks Made by Eco-Friendly Stabilization Materials as Partial or Full Replacement of Cement. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **281**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122535>.
- 62 Hassan, M.K., Chowdhury, R., Ghosh, S., Manna, D., Pappinen, A. and Kuittinen, S. (2021) Energy and Environmental Impact Assessment of Indian Rice Straw for the Production of Second-Generation Bioethanol. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Elsevier Ltd, **47**.



- <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101546>.
- 63 Babé, C., Kidmo, D.K., Tom, A., Mvondo, R.R.N., Boum, R.B.E. and Djongyang, N. (2020) Thermomechanical Characterization and Durability of Adobes Reinforced with Millet Waste Fibers (Sorghum Bicolor). *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier Ltd, **13**. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00422>.
- 64 Olacia, E., Pisello, A.L., Chiodo, V., Maisano, S., Frazzica, A. and Cabeza, L.F. (2020) Sustainable Adobe Bricks with Seagrass Fibres. Mechanical and Thermal Properties Characterization. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **239**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117669>.
- 65 Ige, O. and Danso, H. (2021) Physico-Mechanical and Thermal Gravimetric Analysis of Adobe Masonry Units Reinforced with Plantain Pseudo-Stem Fibres for Sustainable Construction. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **273**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121686>.
- 66 Kafodya, I., Okonta, F. and Kloukinas, P. (2019) Role of Fiber Inclusion in Adobe Masonry Construction. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **26**. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100904>.
- 67 Muñoz, P., Letelier, V., Muñoz, L. and Bustamante, M.A. (2020) Adobe Bricks Reinforced with Paper & Pulp Wastes Improving Thermal and Mechanical Properties. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **254**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119314>.
- 68 Sudhir, M.R., Beulah, M., Sasha Rai, P. and Gayathri, G. (2021) A Microstructure Exploration and Compressive Strength Determination of Red Mud Bricks Prepared Using Industrial Wastes. In: Kumar, K., Davim, J.P. and Babu, B.S., Eds., *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.171>.
- 69 Himouri, K., Hamouine, A. and Guettatfi, L. (2023) Compressive Creep and Ultrasonic Characterization of Adobe Bricks Stabilized with Quicklime, Portland Cement, and Date Palm Fibers. *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2262954>.
- 70 Eslami, A., Mohammadi, H. and Banadaki, H.M. (2022) Palm Fiber as a Natural Reinforcement for Improving the Properties of Traditional Adobe Bricks. *Construction and Building Materials*, **325**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126808>.
- 71 Wang, Y.-S., Alrefaei, Y. and Dai, J.-G. (2019) Silico-Aluminophosphate and Alkali-Aluminosilicate Geopolymers: A Comparative Review. *Frontiers in Materials*, Frontiers Media S.A., **6**. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00106>.
- 72 Lv, X., Wang, K., He, Y. and Cui, X. (2019) A Green Drying Powder Inorganic Coating Based on Geopolymer Technology. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **214**, 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.163>.
- 73 Hussain, M., Levacher, D., Leblanc, N., Zmamou, H., Djeran-Maigre, I., Razakamanantsoa, A. and Saouti, L. (2022) Reuse of Harbour and River Dredged Sediments in Adobe Bricks. *Cleaner Materials*, **3**. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100046>.
- 74 Ige, O. and Danso, H. (2022) Experimental Characterization of Adobe Bricks Stabilized with Rice Husk and Lime for Sustainable Construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **34**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004059](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004059).
- 75 Zhou, T., Wang, X., Ma, B., Zhang, Z. and Tan, W. (2022) Seismic Performance of New Adobe Bricks Masonry: Design and Experiment. *Advances in Structural Engineering*, **25**, 277–289. <https://doi.org/10.1177/13694332211046349>.
- 76 Trang, N.T.M., Ho, N.A.D. and Babel, S. (2021) Reuse of Waste Sludge from Water Treatment Plants and Fly Ash for Manufacturing of Adobe Bricks. *Chemosphere*, **284**. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131367>.
- 77 Ratchakrom, C. and Rodvinij, P. (2021) MECHANICAL BEHAVIOR OF ADOBE BRICKS REINFORCED WITH WATER HYACINTH FIBER. *International Journal of GEOMATE*, **21**, 10–16. <https://doi.org/10.21660/2021.85.6227>.
- 78 Daniel, J.J., Basoro, D. and Gebrie, M. (2021) An Engineered Alternative Brick Masonry Unit for the Poor Inhabitants at Hawassa Village, Ethiopia. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, **8**, 717–734. <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2021.874128>.
- 79 Kafodya, I., Okonta, F. and Kloukinas, P. (2019) Role of Fiber Inclusion in Adobe Masonry Construction. *Journal of Building Engineering*, **26**. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100904>.
- 80 Jové-Sandoval, F., Barbero-Barrera, M.M. and Medina, N.F. (2018) Assessment of the Mechanical



- Performance of Three Varieties of Pine Needles as Natural Reinforcement of Adobe. *Construction and Building Materials*, **187**, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.187>.
- 81 Olaniyan, S.A. (2023) ADOBE BRICKS TO HOLLOW SANDCRETE BLOCK WALLING IN TROPICAL BUILDING CONSTRUCTION: MATERIAL IMPACT ON SUSTAINABLE INDOOR THERMAL COMFORT ATTAINMENT | САМАН ВМЕСТО ПУСТОТЕЛЫХ ПЕСКОБЕТОННЫХ БЛОКОВ СТЕН В ТРОПИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА ДОСТИ. *Architecture and Engineering*, **8**, 68–81. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2023-8-4-68-81>.
- 82 Giaretton, M., Dizhur, D. and Morris, H. (2021) Material Characterisation of Heavy-Weight and Lightweight Adobe Brick Walls and in-Plane Strengthening Techniques. *Construction and Building Materials*, **310**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125309>.
- 83 Arsan, Z.D. and Yöney, E.G. (2019) Impact of Thermal Mass for Future Energy Consumption: Case Study in Adobe House. *International Journal of Global Warming*, **19**, 220–232. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2019.101783>.
- 84 Cardinale, T., Sposato, C., Feo, A. and Fazio, P. De. (2018) Clay and Fibers: Energy Efficiency in Buildings between Tradition and Innovation. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, **5**, 183–189. <https://doi.org/10.18280/mmep.050308>.
- 85 Rasaki, S.A., Bingxue, Z., Guarecuco, R., Thomas, T. and Minghui, Y. (2019) Geopolymer for Use in Heavy Metals Adsorption, and Advanced Oxidative Processes: A Critical Review. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, **213**, 42–58. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.145>.
- 86 Nawaz, M., Heitor, A. and Sivakumar, M. (2020) Geopolymers in Construction - Recent Developments. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **260**. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120472>.
- 87 Salazar-Hernández, C., Puy-Alquiza, M.J., Miranda-Avilés, R., Salazar-Hernández, M., Mendoza-Miranda, J.M., Mocada-Sánchez, C.D. and del Ángel-Soto, J. (2021) Comparative Study of TEOS-Consolidants for Adobe Building Conservation. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, **97**, 685–696. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05461-2>.
- 88 Kerroum, N., Nouibat, B., Benyahia, A. and Redjem, A. (2018) Study of the Performance of Adobe Brick Coated for Sustainable Construction in the Algerian Sahara. *Materiaux et Techniques*, **106**. <https://doi.org/10.1051/mattech/2018041>.
- 89 Krajewska, B. (2018) Urease-Aided Calcium Carbonate Mineralization for Engineering Applications: A Review. *Journal of Advanced Research*, **13**, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.10.009>.
- 90 Farajnia, A., Shafaat, A., Farajnia, S., Sartipipour, M. and Tirkolaei, H.K. (2022) The Efficiency of Ureolytic Bacteria Isolated from Historical Adobe Structures in the Production of Bio-Bricks. *Construction and Building Materials*, **317**, 125868. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125868>.
- 91 Chmykhalo, V., Zolotukhin, P., Murali, G. and Chistyakov, V. (2022) Bioconcrete – Anthropogenic Bioinert Substance. *Live and Bioabiotic Systems*. <https://doi.org/10.18522/2308-9709-2022-41-3>.