

УДК 620.22:620.17

Алюмосиликатные пеноматериалы для получения сэндвич-панелей с сердечником на их основе

Аэрайгули Куомалибиекэ, К.А. Андрианова, Л.М. Амирова

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ

Aluminosilicate foam materials for manufacturing sandwich panels with a core based on them

Aeraiguli Kuomalibieke, K.A. Andrianova, L.M. Amirova

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI

Геополимеры и пеноматериалы на их основе благодаря огнестойкости, легкости, звуко- и теплоизолирующим свойствам имеют высокие потенциальные возможности применения во многих отраслях. Однако до настоящего времени отсутствуют составы, обеспечивающие стабильное вспенивание, а также методы получения геополлимерных материалов с плотностью менее 300 кг/м^3 . Предложены состав и простая технология получения щелочеактивированной алюмосиликатной пены и сэндвич-панелей с сердечником на ее основе. Получены пены низкой плотности ($197 \dots 234 \text{ кг/м}^3$) с равномерной и мелкоячеистой структурой и высокими механическими свойствами. На основании проведенных термогравиметрических измерений в неизотермическом режиме при различных скоростях нагрева и моделирования процесса удаления воды разработан двухступенчатый процесс получения пеноматериала. По результатам реологического исследования оптимизированы режимы перемешивания, предвспенивания и получения пеноматериалов и сэндвич-панелей с сердечником на их основе. Оптимизировано содержание гуммиарабика, показана его двойная функция как поверхностно-активного вещества и стабилизатора при образовании пены. Рассмотрено совместное вспенивающее воздействие воды и азодикарбонамида с учетом температурных и концентрационных интервалов их участия в технологическом процессе получения геополлимерной пены.

EDN: UGYYGX, <https://elibrary/ugyygx>

Ключевые слова: геополимеры, алюмосиликатные пеноматериалы, сэндвич-панели, гуммиарабик, азодикарбонамид

Geopolymers and foam materials based on them are offering a significant potential for using in many industries due to their fire resistance, light weight, sound and heat insulating properties. However, formulations that provide stable foaming, as well as methods for producing the geopolymer materials with densities below 300 kg/m^3 are currently missing. The paper proposes composition and simple technology for producing the alkali-activated aluminosilicate foam and sandwich panels with a core based on it. The low-density foams ($197 \dots 234 \text{ kg/m}^3$) with a uniform, fine-celled structure and high mechanical properties are obtained. A two-stage foam production process is developed based on the thermogravimetric measurements conducted in the non-isothermal mode at the varying heating rates and on simulation of the water removal process. Based on the rheological study results, the mixing, pre-foaming, and foam material production modes and modes for production of the sandwich panels with a core based on them are optimized. The paper improves the gum acacia content, and demonstrates its dual functioning as a surfactant and stabilizer in the foam formation. It considers the combined foaming by water and azodicarbonamide taking into

account the temperature and concentration ranges of their use in the geopolymer foam production process.

EDN: UGYYGX, <https://elibrary/ugyygx>

Keywords: geopolymers, aluminosilicate foam materials, sandwich panels, gum arabic, azodicarbonamide

Благодаря огнестойкости, экологичности и низкой стоимости геополимерные пеноматериалы (на основе алюмосиликатных связующих) вызывают большой интерес исследователей, так как для их получения используют различные отходы производства, такие как легучая зола и металлургические шлаки [1].

Анализ литературы показал, что на сегодняшний день геополимерные пены чаще всего применяют в качестве строительных пенобетонов с высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами [2]. Однако они могут быть использованы и в других областях, например, в качестве адсорбентов, носителей катализаторов и др. [3].

Большое количество обзорных работ, в том числе посвященных используемому сырью [4], разработке состава [5], изучению структуры пор [6], технологии производства геополимерных пен [7], армированию волокнами [8] и оптимизации их механических и функциональных свойств [9] свидетельствует об актуальности данной темы.

Геополимерные материалы синтезируют путем геосинтеза — химической реакции алюмосиликатных прекурсоров с щелочными полисиликатами, в результате которой образуются связи Al–O–Si. Свойства геополимерной матрицы зависят от типа прекурсора и щелочного активатора [10], а также от температуры отверждения [11].

Для улучшения термической стабильности пены натриевые компоненты активатора можно заменить калиевыми [12]. В работе [13] показано, что наличие щелочного активатора оказывает отрицательное воздействие на процесс вспенивания и стабильность пены: эти характеристики ухудшались с увеличением модуля активатора и концентрации Na_2O . Это вызвало ухудшение стабильности свежего пенобетона, но позволило сократить начальное время схватывания и высокую потерю текучести из-за синергетического эффекта стабильности пены и активированного щелочью цементного раствора.

Соотношение активатора и алюмосиликата оказывает влияние на прочностные свойства

синтезируемых геополимеров, причем оптимальное соотношение лежит в диапазоне 1,0...1,5 [13]. Изменение щелочной реакции также влияет на распределение размеров пор, их однородность, плотность и свойства неорганических пен.

В работах [14, 15] пористость геополимеров регулировали, изменяя скорость реакции алюминия без добавления дополнительного вспенивающего агента, и исследовали влияние на развитие пористости и характеристики структуры связующего. Показано, что регулирование соотношения щелочных активаторов влияет на скорость окисления алюминиевой пудры и степень вспенивания.

Различные макросвойства геополимерных пеноматериалов, такие как прочность на сжатие, теплопроводность, проницаемость и др., связаны со структурой пор геополимеров. В свою очередь механизм образования геополимерной пены во многом зависит от реологических свойств геополимерного связующего [16].

В работе [17] показано, что реологические параметры, в частности вязкость, значительно влияют на размер, сферичность и однородность пор. В качестве оптимальной вязкости для достижения желаемой структуры пор указаны ее низкие значения в пределах $1,30 \pm 0,15$ Па·с. В то же время авторы статьи [18] показывают, что увеличение вязкости с 2,16 до 6,65 Па·с уменьшает средний диаметр пор в ячеистом геополимере и позволяет получить желаемую структуру пены.

Таким образом, единого мнения об оптимальном значении вязкости геополимерного связующего в литературе нет, и этот фактор, по-видимому, следует оптимизировать в зависимости от конкретного состава геополимера. Кроме того, исследование зависимости реологического поведения пен под действием напряжения сдвига демонстрирует их сложную вязкоупругую природу [19].

Другой фактор — добавление поверхностно-активного вещества в связующую пасту для уменьшения поверхностного натяжения — однозначно улучшает процесс вспенивания. В ра-

боте [20] показано, что добавление поверхностно-активного вещества в связующую пасту уменьшает средний диаметр пор в ячеистом геополимере.

Также выявлено, что в первую очередь вязкость влияет на деформацию и коалесценцию пены, а в конечном итоге — на высоту вспенивания, внешний вид образца и возникновение разрушения пены. Поверхностное натяжение суспензии в основном оказывает влияние на связность пор. Низкое поверхностное натяжение способствует образованию сильно взаимосвязанных пор, а его более высокие значения — образованию закрытых пор [21].

Геополимеры можно вспенить как физическими методами, так и химическими. Физическое вспенивание выполняется, например, за счет интенсивного испарения воды в растворе геополимера, причем нагрев и вспенивание геополимерной массы происходят благодаря микроволновому излучению, позволяющему значительно сократить время вспенивания [22–24].

В работе [25] показана возможность вспенивания геополимеров путем испарения воды без вспенивающих добавок. Наилучшие плотность (949 кг/м^3) и прочность на сжатие (4,2 МПа) были достигнуты в образцах, вспененных микроволновым излучением, но такие свойства не позволяют отнести геополимеры к легким.

К физическим методам также относится предварительное вспенивание, когда пена на водной основе создается путем отделения разбавленных пенообразователей из генератора пены высокого давления, а затем пена смешивается со свежими цементными пастами для получения пористых материалов [26].

Для химического вспенивания применяют вспенивающие агенты. Согласно литературным данным, в качестве вспенивающих агентов обычно используют перекись водорода [27, 28], перуксусную кислоту [29], порошки алюминия [30, 31], кремния и цинка [25], а вспенивание с H_2O_2 трудно синхронизировать с реакциями геополимеризации. Алюминиевые и кремниевые порошки приводят к быстрым реакциям в щелочных условиях, вследствие чего размеры пор становятся неравномерными. Наиболее эффективным пенообразователем оказался цинковый порошок, с его использованием получены пеноматериалы плотностью 331 кг/м^3 и прочностью на сжатие 1,17 МПа [25].

Несмотря на большое количество работ в области геополимерных пен, до сих пор нет

четкого представления, каковы оптимальные составы и параметры процесса вспенивания. Литературные данные нередко противоречат друг другу, поэтому состав и оптимальные параметры вспенивания выбирают эмпирическим путем.

Согласно данным работы [11], вспененные изоляционные геополимеры имели плотность $150...300 \text{ кг/м}^3$, размер пор $0,57...1,13 \text{ мм}$, пористость $71,8...84,5 \%$, теплопроводность $0,0622...0,0852 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ и прочность на сжатие $0,68...2,23 \text{ МПа}$. Однако повторяемость результатов в промышленных масштабах вызывает сомнения. Механизмы формирования и регулирования структур в пористых геополимерах остаются качественно неясными, что создает значительные проблемы для их практического применения и оптимизации производительности [32].

К сожалению, отсутствие стабильности получаемых геополимерных пен, проблемы и ограничения, которые чаще всего встречаются при внедрении геополимерной технологии, ограничивает их применение в некоторых областях, например в производстве сэндвич-конструкций, для которых привлекательными являются звуко-, теплоизоляционные характеристики и низкая горючесть геополимеров [33].

Цель статьи — разработка состава и технологии получения алюмосиликатных пеноматериалов и исследование возможности их использования в качестве сердечников в сэндвич-изделиях.

Материалы и методы исследования. В качестве исходного компонента выступал метакаолин марки ВМК-45 (ООО «Синерго», Россия) с массовой долей SiO_2 52 % и Al_2O_3 более 42 %. Активирующим агентом служили щелочные растворы силиката натрия, содержащие 30 % силиката натрия и 9 % NaOH . Газообразователем являлся азодикарбонамид (Порофор ЧХЗ-21 по ТУ 6-03-408-80). В качестве пеностабилизатора выбрали гуммиарабик (Е414) — аравийскую камедь.

Для облицовки сэндвич-панелей использовали листы углекомполитов на основе алюмофосфатных связующих, полученные по методике, описанной в работе [34], и жаростойкий слюдопласт ИЖКАХ (ТУ 3492-056-00281915-98) толщиной 0,8 мм (Санкт-Петербургская Слюдяная фабрика).

Материалы измельчали в центробежной мельнице Retsch ZM 200 до получения однородного порошка. Гранулометрический состав полученных порошков определяли на оптическом микроскопе OLYMPUS. Распределение размера частиц проводили на более чем 1200 частицах с применением программного обеспечения SIAMS 700 (Россия). Электронные микрофотографии получали с помощью камеры SIMAGIS 2P-2C.

Для смешивания компонентов использовали верхнеприводную мешалку Heidolph Hei-TORQUE Core со скоростью 100...2000 об/мин. Реологические свойства водных растворов алюмосиликатов определяли на ротационном реометре DHR2 (TA Instruments, США) с рабочим узлом типа «плоскость — плоскость» с диаметром 25 мм и рабочим зазором между плоскостями, равным 1 мм. Измерения выполняли в режиме осцилляции с амплитудой относительной угловой деформации, равной 0,1. Вязкость изучали в режиме нагрева при скорости 3 °С/мин в диапазоне температуры 10...70 °С.

Поверхностное натяжение водных растворов определяли цифровым тензиометром K20 Easy Dyne (Kruss) по методу отрыва кольца Дью Нуи согласно ASTM D1590 в интервале температуры 10...70 °С.

Термическую стабильность композиций определяли методом совмещенной термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии (ТГ/ДСК) с помощью термоанализатора STA 449 C Jupiter (Netzsch). Все эксперименты осуществляли в динамической атмосфере аргона (при скорости подачи газа 75 мл/мин) со скоростью нагрева 15, 10 и 5 °С /мин. ТГ/ДСК-анализ образцов начинали после 10-минутного уравнивания (время, необходимое для уравнивания термовесов) при температуре 25 °С в токе аргона. Расчет ТГ-кривых проводили с помощью программы Proteus Analysis, входящей в состав базового пакета, поставляемого фирмой Netzsch.

Кинетический анализ выполняли на основе данных термогравиметрического анализа (ТГА) с применением программного обеспечения Thermokinetics 3 (Netzsch, Германия) в соответствии с рекомендациями [35]. Из ТГА-кривых, записанных в неизотермическом режиме при различных значениях скорости нагрева, получали кинетические данные и оптимизировали температурно-временные режимы изотермических ступеней процесса.

Плотность пеноматериалов определяли согласно ГОСТ Р 56654–2015 (Композиты полимерные. Метод определения плотности материалов внутреннего слоя «сэндвич»-конструкций).

Механические испытания образцов пенопластов и сэндвич-панелей проводили на электромеханической универсальной испытательной машине Instron 5882 (100 кН). Механические характеристики пеноматериала при сжатии определяли по ГОСТ 23206–2017 (Пластмассы ячеистые жесткие. Метод испытания на сжатие).

Испытания на горючесть выполняли согласно ГОСТ 30244–94 (Материалы строительные. Методы испытания на горючесть).

Приготовление составов и получение пеноматериалов. Порошковые компоненты композиций измельчали до определенных размеров частиц (метакаолин — 10...20 мкм, гуммиарабик — 10...30 мкм, азодикарбонамид — 1...2 мкм). Порошки смешивали в необходимых пропорциях (табл. 1) и перемешивали со скоростью 100...200 об/мин, добавляя к щелочному раствору силиката натрия. Полученную смесь перемешивали в течение 10 мин с постепенным повышением числа оборотов до 1000...2000 и температуры смеси до 30 °С, а затем — при этих условиях еще 10...15 мин. При перемешивании пасты с высокой скоростью она увеличивается в объеме примерно 1,5–2,0 раза.

Такую предварительно вспененную пасту выкладывали в форму для получения образцов пеноматериала с целью испытания на сжатие или на поверхность облицовки для получения сэндвич-панели со вспененным сердечником. Вспенивание проводили путем нагрева полученной пасты при температуре 200...220 °С в течение 15...20 мин.

Обсуждение результатов. Для оптимизации состава геополимерных пеноматериалов соотношение щелочного активатора и метакаолина варьировали в интервале 1,3...1,5 исходя из результатов собственных предварительных исследований и анализа литературы.

Анализ предварительных данных по высокотемпературному вспениванию композиции показал, что газообразование только за счет испарения воды является недостаточно эффективным. Процесс вспенивания вследствие интенсивного испарения воды происходит в диапазоне температуры 100...150 °С, но при

Таблица 1

Состав и характеристики алюмосиликатных пен

Номер состава	Содержание компонентов, % масс				Характеристики пеноматериалов		
	АА	МК	ГО	ГА	Плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	Структура
1	57	43	0	0	315	0,94	Неоднородная
2	56	42	1	1	205	0,89	Однородная
3	55	42	1	2	216	0,91	
4	50	39	1	10	241	1,01	
5	55	42	2	1	232	0,94	
6	53	41	5	1	225	0,92	
7	58	42	0	0	292	0,85	Неоднородная
8	57	41	1	1	197	0,87	Однородная
9	56	41	1	2	201	0,88	
10	52	37	1	10	213	0,90	
11	56	41	2	1	200	0,89	
12	55	39	5	1	199	0,86	
13	60	40	0	0	298	0,90	Неоднородная
14	59	39	1	1	198	0,86	
15	58	39	1	2	206	0,88	
16	53	36	1	10	211	0,89	
17	58	39	2	1	215	0,88	
18	56	38	5	1	202	0,87	

этом алюмосиликат еще достаточно пластичен, и пена легко оседает.

В связи с этим в качестве газообразователя выбрали азодикарбонамид, который при температуре более 150 °С начинает интенсивно разлагаться с выделением газа, необходимого для получения твердой геополимерной пены. Концентрацию азодикарбонамида варьировали в интервале 0...5 % масс.

Для регулирования процесса вспенивания и для стабилизации пены использовали гуммиарабик — природную смолу, растворимую в воде и термостабильную до 250 °С [36]. Концентрацию гуммиарабика варьировали в интервале 0...10 % (большие концентрации приводили к значительному повышению вязкости композиции и ухудшению процесса смешения компонентов и последующего вспенивания).

Состав композиций и характеристики пеноматериалов на их основе приведены в табл. 1, где АА — активирующий агент; ГА — гуммиарабик; МК — метакаолин; ГО — газообразователь.

Из табл. 1 следует, что оптимальным является состав композиции № 8, в которой соотношение метакаолина и активирующего агента

составляет примерно 1,4, содержание азодикарбонамида — 1 %, гуммиарабика — 1 %. Полученный пеноматериал плотностью 197 кг/м³ и прочностью на сжатие 0,87 МПа имеет мелкоячеистую однородную структуру с порами размером 500...700 мкм (рис. 1, а и б).

Для выбора режимов получения пеноматериала проводили термогравиметрические исследования разработанных составов в неизо-

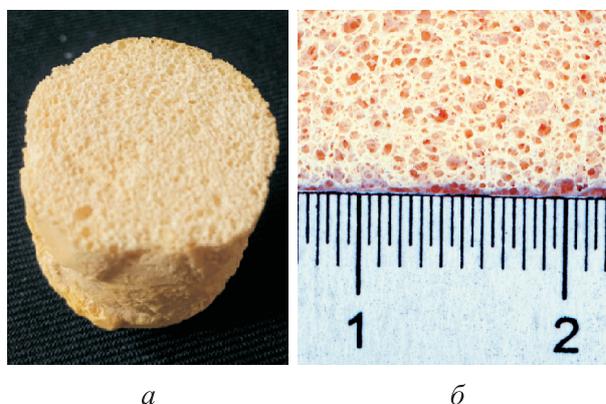


Рис. 1. Микроструктура алюмосиликатного пенопласта при меньшем (а) и большем (б) увеличении

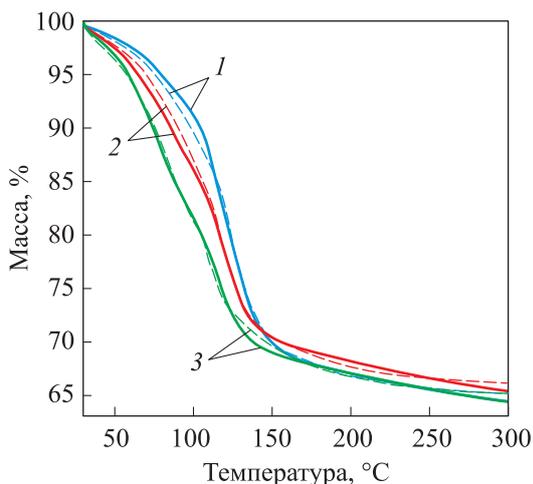


Рис. 2. Экспериментальные (сплошные) и расчетные (пунктирные) зависимости массы состава № 8 от температуры при скорости нагрева 15 (1), 10 (2) и 5 °С/мин (3)

термическом режиме со скоростями 5, 10 и 15 °С/мин с последующим моделированием процесса. Исходными данными для моделирования являлись кинетические и теплофизические характеристики композиций разного состава (см. табл. 1).

Таблица 2

Оптимальные параметры уравнения (1)

Номер состава	$\log A_1, \text{ c}^{-1}$	$E_1, \text{ кДж/моль}$	n_1	m	$\log A_2, \text{ c}^{-1}$	$E_2, \text{ кДж/моль}$	n_2	Коэффициент корреляции
1	3,90985	42,78	0,82455	0,55006	125,43116	199,42663	7,94998	0,9970
2	3,93516	43,17	0,91069	0,59684	125,79233	199,58933	8,18999	0,9953
3	3,92739	43,09	0,91002	0,57674	125,80033	199,57341	8,22644	0,9974
4	3,90996	43,01	0,86989	0,56147	125,78541	199,56328	8,19955	0,9967
5	3,91493	43,08	0,91001	0,57557	125,7691	199,54772	8,19859	0,9959
6	3,92585	43,10	0,91004	0,58153	125,78992	199,51899	8,21278	0,9983
7	3,90978	42,88	0,86858	0,55029	125,41698	199,41012	7,93788	0,9982
8	3,93706	43,19	0,91079	0,59976	125,80177	199,58953	8,27783	0,9993
9	3,93021	43,11	0,91003	0,58468	125,76994	199,57856	8,19970	0,9988
10	3,92968	43,09	0,91001	0,57684	125,77441	199,56437	8,11989	0,9973
11	3,92798	43,08	0,89889	0,57579	125,69898	199,55893	8,19888	0,9969
12	3,93022	43,11	0,91002	0,58163	125,78742	199,50558	8,19995	0,9978
13	3,90979	42,94	0,86288	0,55157	125,42377	199,41989	7,94878	0,9936
14	3,91989	43,04	0,86987	0,56738	125,77563	199,49868	8,19894	0,9980
15	3,92768	43,09	0,91001	0,57798	125,79442	199,56438	8,20261	0,9988
16	3,93011	43,10	0,91002	0,58125	125,72119	199,55689	8,19978	0,9969
17	3,92995	43,11	0,91004	0,58168	125,76551	199,56896	8,20023	0,9976
18	3,92879	43,09	0,91001	0,57874	125,79835	199,57009	8,19798	0,9983

Для получения кинетических параметров удаления воды применяли аппроксимацию термограмм ТГА, записанных при различных скоростях нагрева, в рамках уравнения

$$\frac{d\alpha}{dt} = A_1 e^{-\frac{E_1}{RT}} \alpha^m (1-\alpha)^{n_1} + A_2 e^{-\frac{E_2}{RT}} (1-\alpha)^{n_2}, \quad (1)$$

где A_1, A_2 — константы уравнения Аррениуса, c^{-1} ; E_1, E_2 — энергии активации, Дж/моль ; T — температура, K ; R — универсальная газовая постоянная, $\text{Дж/(моль}\cdot\text{K)}$; m, n_1, n_2 — порядки реакции.

Результаты аппроксимации термограмм ТГА методом нелинейной регрессии для состава № 8 приведены на рис. 2, а оптимальные параметры уравнения (1) — в табл. 2.

Как следует из табл. 2, для всех составов параметры достаточно близки, поэтому предложен двухступенчатый режим получения пеноматериалов.

Температурно-временные режимы процесса получения пеноматериалов для всех составов и динамика удаления воды на примере состава № 8 приведены на рис. 3.

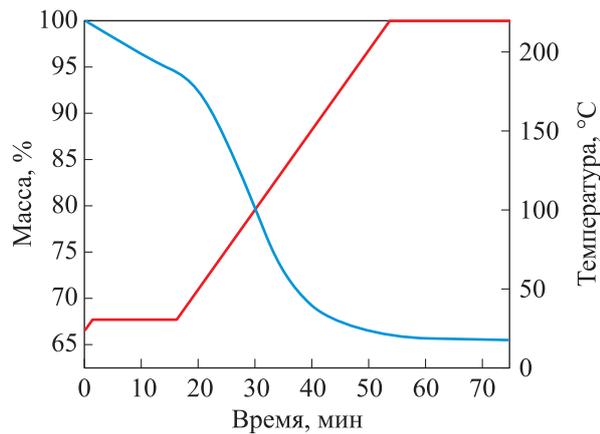


Рис. 3. Температурно-временные режимы процесса получения пеноматериалов для всех составов (—) и динамика удаления воды на примере состава № 8 (—)

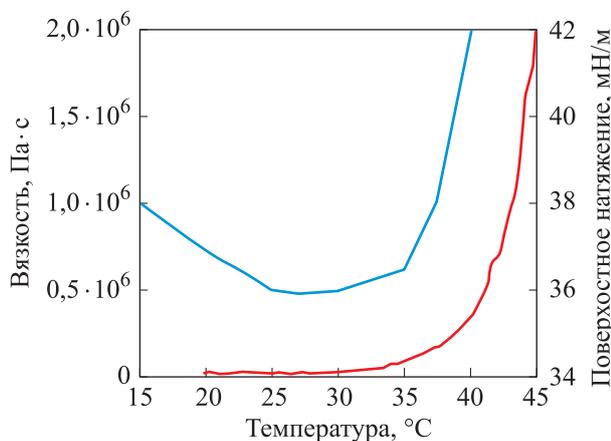


Рис. 4. Зависимости вязкости (—) и поверхностного натяжения (—) от температуры алюмосиликатного состава № 8 при скорости нагрева 5 °C/мин

Температура первой ступени (30 °C) выбрана исходя из особенностей реологического поведения составов при повышении температуры, а также из температурной зависимости поверхностного натяжения (рис. 4).

Как видно из рис. 4, вязкость почти не меняется, а поверхностное натяжение немного снижается при нагреве до 30 °C, что на первом этапе процесса облегчает перемешивание и предвспенивание композиции. Кроме того, при этой температуре за 10...15 мин удаляется около 5...6 % воды, что положительно сказывается на последующем этапе вспенивания, не вызывая образования крупных пузырьков вследствие избыточных паров воды.

На втором этапе при повышении температуры до 220 °C вязкость резко возрастает и препятствует объединению пузырьков газа, об-

разованных до температуры 150 °C парами воды, а затем продуктами разложения азодикарбонамида. Таким образом, выбранный двухступенчатый процесс вспенивания (первая ступень — температура 30 °C и время 10...15 мин, вторая ступень — температура 220 °C и время 25...20 мин) позволяет получать легкие и достаточно прочные алюмосиликатные пеноматериалы.

Сэндвич-панели с сердечником из алюмосиликатного пеноматериала получали на основе облицовки из углекомпозиата и слюдопласта с алюмофосфатными матрицами. Внешний вид алюмосиликатной композиции, выложенной на одну из поверхностей сэндвич-панели перед вспениванием показан на рис. 5, а, а внешний вид сэндвич-панели из углекомпозиата на основе алюмофосфатной матрицы с сердечником из алюмосиликатной пены — на рис. 5, б.

Коэффициент вспенивания при получении сэндвич-панели можно контролировать высотой ограничителей, устанавливаемых по ее периметру. Пластины из слюдопласта с выложенной на их поверхность алюмосиликатной композицией без ограничителя и с ограничителем приведены на рис. 6, а и б.

Вспенивание сэндвич-панелей можно проводить в гидравлическом прессе с нагреваемыми плитами или в печи, обеспечивая фиксацию верхней облицовки сэндвич-изделия для исключения его поднятия под давлением вспенивания.

Все полученные пеноматериалы и сэндвич-панели с облицовкой из слюдопластов и углекомпозиатов на основе алюмофосфатных связующих относятся к группе горючести Г1 согласно

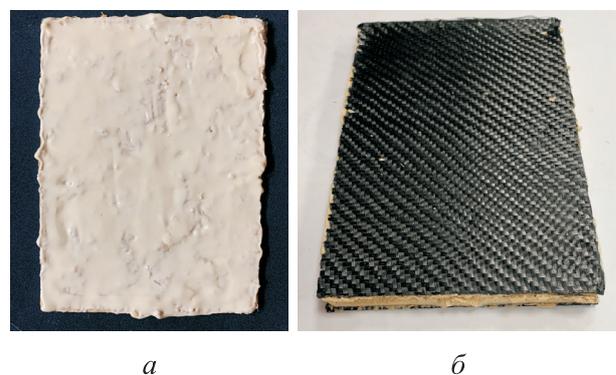


Рис. 5. Внешний вид алюмосиликатной композиции, выложенной на одну из поверхностей сэндвич-панели перед вспениванием, (а) и сэндвич-панели из углекомпозиата на основе алюмофосфатной матрицы с сердечником из алюмосиликатной пены (б)



Рис. 6. Внешний вид пластин из слюдопласта с выложенной на их поверхность алюмосиликатной композицией без ограничителя (а) и с ограничителем (б)

испытаниям по ГОСТ 30244–94 (Материалы строительные. Методы испытания на горючесть).

Выводы

1. Разработаны составы и способ получения пеноматериалов на основе алюмосиликатов с использованием гуммиарабика в качестве регулятора пенообразования и азодикарбонамида в качестве вспенивающего агента. Показана возможность получения сэндвич-панелей с сердечником из алюмосиликатной пены при их облицовке углекомпозитом и слюдопластом с алюмофосфатной матрицей.

2. На основе термогравиметрических и реологических исследований предложен двухступенчатый режим вспенивания с предвспениванием при температуре 30 °С в течение 10...15 мин и с высокотемпературным вспениванием при температуре 220 °С в течение 20...30 мин.

Литература

- [1] Novais R.M., Pullar R.C., Labrincha J.A. Geopolymer foams: an overview of recent advancements. *Prog. Mater. Sci.*, 2020, vol. 109, art. 100621, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100621>
- [2] Dhasindrakrishna K., Pasupathy K., Ramakrishnan S. et al. Progress, current thinking and challenges in geopolymer foam concrete technology. *Cem. Concr. Compos.*, 2021, vol. 116, art. 103886, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103886>
- [3] Kočí V., Černý R. Directly foamed geopolymers: a review of recent studies. *Cem. Concr. Compos.*, 2022, vol. 130, art. 104530, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104530>
- [4] Yu H., Xu M., Chen C. et al. A review on the porous geopolymer preparation for structural and functional materials applications. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 1793–1813, doi: <https://doi.org/10.1111/ijac.14028>
- [5] Song Y., Xue C., Guo W. et al. Foamed geopolymer insulation materials: research progress on insulation performance and durability. *J. Clean. Prod.*, 2024, vol. 444, art. 140991, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140991>
- [6] Chen S., Ruan S., Zeng Q. et al. Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: a review. *Constr. Build. Mater.*, 2022, vol. 328, art. 127064, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127064>
- [7] Zhang X., Bai C., Qiao Y. et al. Porous geopolymer composites: a review. *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, 2021, vol. 150, art. 106629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106629>
- [8] Dhasindrakrishna K., Pasupathy K., Ramakrishnan S. et al. Rheology and elevated temperature performance of geopolymer foam concrete with varying PVA fibre dosage. *Mater. Lett.*, 2022, vol. 328, art. 133122, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133122>
- [9] Nodehi M. A comparative review on foam-based versus lightweight aggregate-based alkali-activated materials and geopolymer. *Innov. Infrastruct. Solut.*, 2021, vol. 6, no. 4, art. 231, doi: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00595-w>
- [10] Liu Y.L., Liu C., Qian L.P. et al. Foaming processes and properties of geopolymer foam concrete: effect of the activator. *Constr. Build. Mater.*, 2023, vol. 391, art. 131830, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131830>
- [11] Wu J., Zhang Z., Zhang Y. et al. Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed geopolymer (UFG) based on fly ash-metakaolin blends. *Constr. Build. Mater.*, 2018, vol. 168, pp. 771–779, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.097>
- [12] Traven K., Češnovar M., Škapin S.D. et al. High temperature resistant fly-ash and metakaolin-based alkali-activated foams. *Ceram. Int.*, 2021, vol. 47, no. 17, pp. 25105–25120, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.241>

- [13] Dang J., Tang X., Xiao J. et al. Influence of alkaline activator and precursor on the foam characterization and alkali-activated foamed concrete properties. *Cem. Concr. Compos.*, 2024, vol. 145, art. 105341, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105341>
- [14] Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P. et al. Alkali activated slag foams: the effect of the alkali reaction on foam characteristics. *J. Clean. Prod.*, 2017, vol. 147, pp. 330–339, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.134>
- [15] Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P. et al. Regulating the chemical foaming reaction to control the porosity of geopolymer foams. *Mater. Des.*, 2017, vol. 120, pp. 255–265, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.026>
- [16] Gu G., Xu F., Huang X. et al. Foamed geopolymer: the relationship between rheological properties of geopolymer paste and pore-formation mechanism. *J. Clean. Prod.*, 2020, vol. 277, art. 123238, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123238>
- [17] Fan D., Zhang C., Lu J.X. et al. Rheology dependent pore structure optimization of high-performance foam concrete. *Cem. Concr. Res.*, 2025, vol. 188, art. 107737, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107737>
- [18] Liu C., Zhang Z., Jia Z. et al. Quantitative characterization of bubble stability of foam concrete throughout extrusion process: from yield stress, viscosity and surface tension point of view. *Compos. B Eng.*, 2024, vol. 284, art. 111724, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111724>
- [19] Moradpour N., Yang J., Tsai P.A. Liquid foam: fundamentals, rheology, and applications of foam displacement in porous structures. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 2024, vol. 74, art. 101845, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2024.101845>
- [20] Gadkar A., Subramaniam K.V.L. Porosity and pore structure control in cellular geopolymer using rheology and surface tension modifiers. *Constr. Build. Mater.*, 2022, vol. 323, art. 126600, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126600>
- [21] Shao N., Dong C., Wei X. et al. Quantitative characterization and control mechanism of pore structure in geopolymer foams with addition of various surfactants. *Cem. Concr. Compos.*, 2024, vol. 149, art. 105522, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105522>
- [22] Li X., Zheng J., Zheng K. et al. Rapid fabrication of coal gangue-based alkali activated foams and application as pH regulators. *Mater. Lett.*, 2023, vol. 338, art. 134020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134020>
- [23] Zheng J., Li X., Bai C. et al. Rapid fabrication of porous metakaolin-based geopolymer via microwave foaming. *Appl. Clay Sci.*, 2024, vol. 249, art. 107238, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107238>
- [24] Li X., Qiao Y., Shao J. et al. Sodium-based alkali-activated foams from self-ignition coal gangue by facile microwave foaming route. *Ceram. Int.*, 2022, vol. 48, no. 22, pp. 33914–33925, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.340>
- [25] Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Izvarin A.I. et al. Influence of foaming additives on the porous structure and properties of lightweight geopolymers based on ash–slag waste. *Constr. Build. Mater.*, 2024, vol. 443, art. 137629, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137629>
- [26] Yan D., Shi Y., Zhang Y. et al. A comparative study of porous geopolymers synthesized by pre-foaming and H₂O₂ foaming methods: strength and pore structure characteristics. *Ceram. Int.*, 2024, vol. 5, no. 10, pp. 17807–17817, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.270>
- [27] Wang S., Li H., Zou S. et al. Experimental research on a feasible rice husk/geopolymer foam building insulation material. *Energy Build.*, 2020, vol. 226, art. 110358, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110358>
- [28] Matalkah F., Ababneh A., Aqel R. Synthesis of calcined kaolin-based geopolymer foam: Assessment of mechanical properties, thermal insulation, and elevated temperature stability. *Ceram. Int.*, 2023, vol. 49, no. 6, pp. 9967–9977, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.174>
- [29] Bhuyan M.A.H., Kurtulus C., Heponiemi A. et al. Peracetic acid as a novel blowing agent in the direct foaming of alkali-activated materials. *Appl. Clay Sci.*, 2023, vol. 231, art. 106727, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106727>
- [30] Ibrahim J.E.F.M., Şahin E.I., Kabatas M.A.B.M. et al. Sustainable fabrication of lightweight geopolymer foams from silica-fume and zeolite tuffs: utilizing Al as foaming agent for thermal insulation. *Case Stud. Constr. Mater.*, 2024, vol. 21, art. e04024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04024>

- [31] Sitarz M., Zdeb T., Mroz K. et al. Foaming and physico-mechanical properties of geopolymer pastes manufactured from post-metallurgical recycled slag. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 6, art. 1449, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17061449>
- [32] Yue X., Cheng C., Fan A. et al. Evaluation of the surfactant effect on the mechanical and pore properties of porous geopolymers. *Green Mater.*, 2024, pp. 1–13, doi: <https://doi.org/10.1680/jgrma.24.00186>
- [33] Łach M. Geopolymer foams — will they ever become a viable alternative to popular insulation materials? A critical opinion. *Materials*, 2021, vol. 14, no.13, art. 3568, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14133568>
- [34] Gaifutdinov A.M., Andrianova K.A., Amirova L.M. et al. Optimizing the manufacturing technology of high-strength fiber reinforced composites based on aluminophosphates. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2024, vol. 185, art. 108310, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108310>
- [35] Koga N., Vyazovkin S., Burnham A.K. et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal decomposition kinetics. *Thermochim. Acta*, 2023, vol. 719, art. 179384, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179384>
- [36] Daoub R.M.A., Elmubarak A.H., Misran M. et al. Characterization and functional properties of some natural Acacia gums. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 241–249, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.05.002>

References

- [1] Novais R.M., Pullar R.C., Labrincha J.A. Geopolymer foams: an overview of recent advancements. *Prog. Mater. Sci.*, 2020, vol. 109, art. 100621, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100621>
- [2] Dhasindrakrishna K., Pasupathy K., Ramakrishnan S. et al. Progress, current thinking and challenges in geopolymer foam concrete technology. *Cem. Concr. Compos.*, 2021, vol. 116, art. 103886, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103886>
- [3] Kočí V., Černý R. Directly foamed geopolymers: a review of recent studies. *Cem. Concr. Compos.*, 2022, vol. 130, art. 104530, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104530>
- [4] Yu H., Xu M., Chen C. et al. A review on the porous geopolymer preparation for structural and functional materials applications. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 1793–1813, doi: <https://doi.org/10.1111/ijac.14028>
- [5] Song Y., Xue C., Guo W. et al. Foamed geopolymer insulation materials: research progress on insulation performance and durability. *J. Clean. Prod.*, 2024, vol. 444, art. 140991, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140991>
- [6] Chen S., Ruan S., Zeng Q. et al. Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: a review. *Constr. Build. Mater.*, 2022, vol. 328, art. 127064, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127064>
- [7] Zhang X., Bai C., Qiao Y. et al. Porous geopolymer composites: a review. *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, 2021, vol. 150, art. 106629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106629>
- [8] Dhasindrakrishna K., Pasupathy K., Ramakrishnan S. et al. Rheology and elevated temperature performance of geopolymer foam concrete with varying PVA fibre dosage. *Mater. Lett.*, 2022, vol. 328, art. 133122, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133122>
- [9] Nodehi M. A comparative review on foam-based versus lightweight aggregate-based alkali-activated materials and geopolymer. *Innov. Infrastruct. Solut.*, 2021, vol. 6, no. 4, art. 231, doi: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00595-w>
- [10] Liu Y.L., Liu C., Qian L.P. et al. Foaming processes and properties of geopolymer foam concrete: effect of the activator. *Constr. Build. Mater.*, 2023, vol. 391, art. 131830, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131830>
- [11] Wu J., Zhang Z., Zhang Y. et al. Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed geopolymer (UFG) based on fly ash-metakaolin blends. *Constr. Build. Mater.*, 2018, vol. 168, pp. 771–779, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.097>
- [12] Traven K., Češnovar M., Škapin S.D. et al. High temperature resistant fly-ash and metakaolin-based alkali-activated foams. *Ceram. Int.*, 2021, vol. 47, no. 17, pp. 25105–25120, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.241>

- [13] Dang J., Tang X., Xiao J. et al. Influence of alkaline activator and precursor on the foam characterization and alkali-activated foamed concrete properties. *Cem. Concr. Compos.*, 2024, vol. 145, art. 105341, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105341>
- [14] Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P. et al. Alkali activated slag foams: the effect of the alkali reaction on foam characteristics. *J. Clean. Prod.*, 2017, vol. 147, pp. 330–339, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.134>
- [15] Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P. et al. Regulating the chemical foaming reaction to control the porosity of geopolymer foams. *Mater. Des.*, 2017, vol. 120, pp. 255–265, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.026>
- [16] Gu G., Xu F., Huang X. et al. Foamed geopolymer: the relationship between rheological properties of geopolymer paste and pore-formation mechanism. *J. Clean. Prod.*, 2020, vol. 277, art. 123238, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123238>
- [17] Fan D., Zhang C., Lu J.X. et al. Rheology dependent pore structure optimization of high-performance foam concrete. *Cem. Concr. Res.*, 2025, vol. 188, art. 107737, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107737>
- [18] Liu C., Zhang Z., Jia Z. et al. Quantitative characterization of bubble stability of foam concrete throughout extrusion process: from yield stress, viscosity and surface tension point of view. *Compos. B Eng.*, 2024, vol. 284, art. 111724, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111724>
- [19] Moradpour N., Yang J., Tsai P.A. Liquid foam: fundamentals, rheology, and applications of foam displacement in porous structures. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 2024, vol. 74, art. 101845, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2024.101845>
- [20] Gadkar A., Subramaniam K.V.L. Porosity and pore structure control in cellular geopolymer using rheology and surface tension modifiers. *Constr. Build. Mater.*, 2022, vol. 323, art. 126600, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126600>
- [21] Shao N., Dong C., Wei X. et al. Quantitative characterization and control mechanism of pore structure in geopolymer foams with addition of various surfactants. *Cem. Concr. Compos.*, 2024, vol. 149, art. 105522, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105522>
- [22] Li X., Zheng J., Zheng K. et al. Rapid fabrication of coal gangue-based alkali activated foams and application as pH regulators. *Mater. Lett.*, 2023, vol. 338, art. 134020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134020>
- [23] Zheng J., Li X., Bai C. et al. Rapid fabrication of porous metakaolin-based geopolymer via microwave foaming. *Appl. Clay Sci.*, 2024, vol. 249, art. 107238, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107238>
- [24] Li X., Qiao Y., Shao J. et al. Sodium-based alkali-activated foams from self-ignition coal gangue by facile microwave foaming route. *Ceram. Int.*, 2022, vol. 48, no. 22, pp. 33914–33925, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.340>
- [25] Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Izvarin A.I. et al. Influence of foaming additives on the porous structure and properties of lightweight geopolymers based on ash–slag waste. *Constr. Build. Mater.*, 2024, vol. 443, art. 137629, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137629>
- [26] Yan D., Shi Y., Zhang Y. et al. A comparative study of porous geopolymers synthesized by pre-foaming and H₂O₂ foaming methods: strength and pore structure characteristics. *Ceram. Int.*, 2024, vol. 5, no. 10, pp. 17807–17817, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.270>
- [27] Wang S., Li H., Zou S. et al. Experimental research on a feasible rice husk/geopolymer foam building insulation material. *Energy Build.*, 2020, vol. 226, art. 110358, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110358>
- [28] Matalkah F., Ababneh A., Aqel R. Synthesis of calcined kaolin-based geopolymer foam: Assessment of mechanical properties, thermal insulation, and elevated temperature stability. *Ceram. Int.*, 2023, vol. 49, no. 6, pp. 9967–9977, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.174>
- [29] Bhuyan M.A.H., Kurtulus C., Heponiemi A. et al. Peracetic acid as a novel blowing agent in the direct foaming of alkali-activated materials. *Appl. Clay Sci.*, 2023, vol. 231, art. 106727, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106727>
- [30] Ibrahim J.E.F.M., Şahin E.I., Kabatas M.A.B.M. et al. Sustainable fabrication of lightweight geopolymer foams from silica-fume and zeolite tuffs: utilizing Al as foaming agent for

- thermal insulation. *Case Stud. Constr. Mater.*, 2024, vol. 21, art. e04024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04024>
- [31] Sitarz M., Zdeb T., Mroz K. et al. Foaming and physico-mechanical properties of geopolymer pastes manufactured from post-metallurgical recycled slag. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 6, art. 1449, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17061449>
- [32] Yue X., Cheng C., Fan A. et al. Evaluation of the surfactant effect on the mechanical and pore properties of porous geopolymers. *Green Mater.*, 2024, pp. 1–13, doi: <https://doi.org/10.1680/jgrma.24.00186>
- [33] Łach M. Geopolymer foams — will they ever become a viable alternative to popular insulation materials? A critical opinion. *Materials*, 2021, vol. 14, no.13, art. 3568, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14133568>
- [34] Gaifutdinov A.M., Andrianova K.A., Amirova L.M. et al. Optimizing the manufacturing technology of high-strength fiber reinforced composites based on aluminophosphates. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2024, vol. 185, art. 108310, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108310>
- [35] Koga N., Vyazovkin S., Burnham A.K. et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal decomposition kinetics. *Thermochim. Acta*, 2023, vol. 719, art. 179384, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179384>
- [36] Daoub R.M.A., Elmubarak A.H., Misran M. et al. Characterization and functional properties of some natural Acacia gums. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 241–249, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.05.002>

Статья поступила в редакцию 24.02.2025

Информация об авторах

КУОМАЛИБИЕКЭ Аэрайгули — аспирант кафедры производства летательных аппаратов. Казанский национальный Исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: arai0415@mail.ru).

АНДРИАНОВА Кристина Александровна — кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: KAAndrianova@kai.ru).

АМИРОВА Лилия Миниахмедовна — доктор химических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: amirovaliliyam@mail.ru).

Information about the authors

KUOMALIBIEKE Aeraiguli — Postgraduate, Department of Aircraft Manufacturing. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: arai0415@mail.ru).

ANDRIANOVA Kristina Alexandrovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Aircraft Manufacturing, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: KAAndrianova@kai.ru).

AMIROVA Liliya Miniakhmedovna — Doctor of Science (Chemistry), Professor, Department of Aircraft Manufacturing. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: amirovaliliyam@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Куомалибиекэ Аэрайгули, Андрианова К.А., Амирова Л.М. Алюмосиликатные пеноматериалы для получения сэндвич-панелей с сердечником на их основе. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 10, с. 116–127.

Please cite this article in English as:

Kuomalibieke Aeraiguli, Andrianova K.A., Amirova L.M. Aluminosilicate foam materials for manufacturing sandwich panels with a core based on them. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 10, pp. 116–127.