



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-3-82-87>
УДК 621.742.52, 621.742.59

Поступила 30.07.2021
Received 30.07.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАКУУМА НА ОТВЕРЖДЕНИЕ СМЕСЕЙ НА СИЛИКАТНОМ СВЯЗУЮЩЕМ

О. А. РУСЕВИЧ, С. Л. РОВИН, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: rusevich@bntu.by

В статье представлены результаты исследований влияния вакуумирования на процессы отверждения жидкостекляных смесей. Описаны методика проведения экспериментов с применением оригинальной лабораторной вакуумной установки и механизмы отверждения жидкостекляной смеси при различных методах упрочнения. Исследования показали, что вакуумирование позволяет значительно ускорить отверждение и увеличить прочность смеси при одновременном снижении содержания силикатного связующего. Это, в свою очередь, облегчает выбиваемость жидкостекляных смесей и расширяет перспективы использования этих экологически чистых смесей в литейном производстве как альтернативы смесям на органических связующих.

Ключевые слова. Жидкостекляное связующее, вакуум, отверждение, прочность, выбиваемость, формовочные и стержневые смеси.

Для цитирования. Русевич, О. А. Исследование влияния вакуума на отверждение смесей на силикатном связующем / О. А. Русевич, С. Л. Ровин // *Литье и металлургия*. 2021. № 3. С. 82–87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-3-82-87>.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF VACUUM ON THE CURING OF MIXTURES ON A SILICATE BINDER

O. A. RUSEVICH, S. L. ROVIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty Ave. E-mail: rusevich@bntu.by

The article presents the results of a study of the effect of vacuuming on the curing processes of liquid-glass mixtures. The method of conducting experiments using an original laboratory vacuum installation and the mechanisms of curing a liquid-glass mixture with various hardening methods are described. Studies have shown that vacuuming can significantly accelerate the curing and increase the strength of the mixture while reducing the content of the silicate binder. This, in turn, facilitates the knockability of liquid-glass mixtures and expands the prospects for using these environmental friendly mixtures in foundry as an alternative to sands based on organic binders.

Keywords. Liquid-glass binder, vacuum, curing, strength, knockability, molding and core sand.

For citation. Rusevich O. A., Rovin S. L. Investigation of the effect of vacuum on the curing of mixtures on a silicate binder. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 82–87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-3-82-87>.

Введение

Одним из главных направлений развития литейного производства является создание экологически чистых технологий с применением доступных и недорогих материалов, с минимальным образованием отходов и пылегазовых выбросов. При оценке с этой точки зрения процессов изготовления отливок с использованием разовых форм и стержней важнейшую роль играет выбор связующих композиций.

В то же время, сегодня, в Республике Беларусь, как и во всем мире, для изготовления стержней, а в мелкосерийном производстве – и форм, преимущественно используются смеси на органических смоляных связующих. Их применение сопровождается значительными выделениями токсичных газов (аммиак, ацетон, акролеин, фенол, формальдегиды, фурфурол и др.) как в процессах приготовления смеси и отверждения стержней и форм, так и при заливке формы расплавом, кристаллизации и охлаждении отливки [1].

Использование экологически чистых смесей на силикатном связующем, несмотря на доступность и невысокие цены жидкого стекла, значительно уступает песчано-смоляным смесям из-за ряда

технологических недостатков, важнейшими из которых являются хрупкость, осыпаемость, большая чем у песчано-смоляных смесей усадка и, главное, высокая остаточная прочность, затрудняющая выбивку и регенерацию смеси [2].

Существует множество различных способов влияния на свойства жидкостекольных смесей. К таким способам относятся модифицирование жидкостекольного связующего, введение различных добавок в смесь, физические и физико-химические методы воздействия на жидкое стекло в процессе его получения и на смесь в процессе ее приготовления и отверждения.

Все эти способы по основному направлению воздействия на смесь условно можно разделить на три группы: способы, направленные на увеличение прочности единичного контакта между частицами смеси, позволяющие таким образом уменьшить количество связующего; способы, приводящие к разупрочнению или разрушению связей между частицами смеси при ее высокотемпературном нагреве (после заливки расплавом); способы, изменяющие высокотемпературные свойства жидкого стекла, исключаяющие или значительно снижающие спекание частиц при высоких температурах. При всем многообразии наиболее эффективным методом улучшения выбиваемости является снижение содержания жидкого стекла [2, 3].

Существенное влияние на объемную и поверхностную прочность жидкостекольных смесей, а также на их остаточную прочность и соответственно выбиваемость оказывают способы отверждения силикатного связующего. В литейном производстве, как правило, используются четыре основных метода отверждения жидкостекольных смесей: тепловой сушкой (нагревом при 220–250 °С или продувкой теплым воздухом), продувкой углекислым газом (CO₂-процесс), порошкообразными (чаще всего используются материалы на основе двухкальциевых силикатов – феррохромовый шлак, портландцементы и др.) и жидкими отвердителями (сложные эфиры, например, ацетатэтиленгликоль). Известно также, что жидкостекольные смеси способны отверждаться и на воздухе – процесс провяливания. При этом есть предположение, что этот процесс связан не только с естественной сушкой (обезвоживанием) смеси, но и с содержанием в воздухе углекислого газа. Однако отверждение жидкостекольных форм и стержней на воздухе очень длительный процесс, занимает 8–12 ч и более, и на практике практически не используется. В зависимости от способа отверждения и используемых отвердителей в результате протекающих коагуляционно-химических процессов образуются гель кремниевой кислоты и различные гидросиликаты (чаще всего натрия и кальция), которые и определяют прочностные характеристики жидкостекольных форм и стержней [2, 3].

Все процессы отверждения, независимо от способа и применяемых отвердителей, сопровождаются обезвоживанием жидкого стекла при гелеобразовании. В то же время одним из известных способов интенсификации процессов сушки, обезвоживания, сублимации различных дисперсных, пористых, волокнистых и коллоидных материалов является вакуумирование. Обработка материалов при пониженном давлении активно используется в химической и текстильной промышленности, в фармацевтике, деревообработке и индустрии строительных материалов [4].

Учитывая это, представляется весьма перспективным изучение и применение вакуума в процессах отверждения литейных формовочных и стержневых смесей на силикатных связующих. При этом создание пониженного давления в объеме смеси должно не только ускорить процессы испарения влаги, но также интенсифицировать процессы массопереноса и удаления газообразных продуктов реакций, сопровождающих отверждение.

Описание методики и экспериментальной установки

Для изучения влияния вакуума на процессы отверждения жидкостекольных смесей была разработана методика исследований и изготовлена специальная лабораторная установка (рис. 1).

Установка работает следующим образом: в цилиндрическую вакуумную камеру 1 помещается оснастка 3 со стандартными цилиндрическими образцами или «восьмерками» из жидкостекольной смеси. Сверху камера герметично закрывается крышкой 2 со штуцером 7, на который в зависимости от задачи может устанавливаться заглушка или шланг для подключения к баллону с углекислым газом. В днище вакуумной камеры устанавливается штуцер 8, на который надевается шланг от вакуумного насоса. Для создания разряжения используется форвакуумный насос. Между вакуумной камерой и вакуумным насосом устанавливается углеродная ловушка для улавливания влаги и предотвращения ее попадания в масло. На крышке установлены манометр 5 и вакуумметр 6, позволяющие контролировать давление и разрежение в камере. На выходе из баллона с углекислым газом устанавливают редуктор 9 и манометр 4, которые позволяют регулировать и контролировать давление и скорость подачи CO₂ [5].

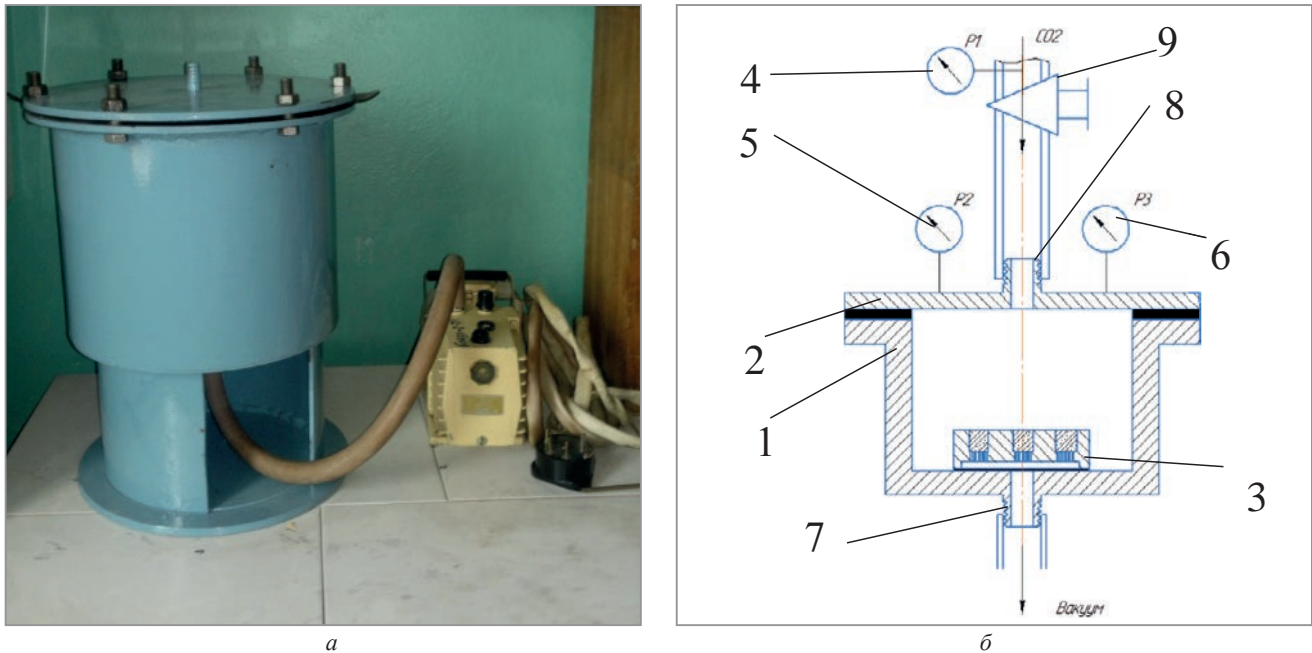


Рис. 1. Лабораторная установка для исследования влияния вакуума на свойства жидкостекольных смесей:
а – внешний вид; б – схема установки

При проведении экспериментальных исследований были поставлены и решены следующие задачи:

- исследовать влияние вакуумирования на процесс отверждения жидкостекольной смеси углекислым газом;
- исследовать процесс отверждения жидкостекольной смеси в вакууме;
- исследовать процесс отверждения жидкостекольной смеси при продувке воздухом;
- сравнить процессы отверждения жидкостекольных смесей в вакууме с традиционными способами отверждения: на воздухе, тепловой сушкой и продувкой углекислым газом.

Отвержденные в соответствии с указанными методами стандартные образцы сравнивали по показателям прочности на сжатие (цилиндрические образцы) и растяжение (восьмерки) по ГОСТ 23409.7–78, а также на выбиваемость по методике, предложенной А. М. Ляссом [6].

Режимы отверждения и их основные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры исследованных режимов отверждения

Номер эксперимента	Последовательность действий
1	Вакуумная камера с исследуемыми образцами заполняется углекислым газом под избыточным давлением 0,3 МПа, после чего включается вакуумный насос и просасывает CO_2 через образцы
2	Образцы помещаются в камеру и выдерживаются при постоянной работе вакуумного насоса под разрежением 10 Па в течение 20, 30 и 40 мин
3	CO_2 -процесс: образцы продуваются углекислым газом в течение 7 с под давлением 0,3 МПа
4	Через образцы, помещенные в камеру, вакуумнасосом в течение 30 и 50 мин просасывается воздух
5	Провяливание образцов на воздухе в течение 8, 12, 24 ч
6	Отверждение нагревом при температуре 220 °С в течение 60 мин

В качестве базового состава на всех режимах отверждения использовали смесь, содержащую 5% жидкого стекла с модулем 3,0 и плотностью 1,45 кг/м³. При исследовании процесса отверждения смеси под вакуумом (режим № 2) и сравнении его с традиционным CO_2 -процессом использовали смеси с содержанием жидкого стекла от 3 до 6% (табл. 2).

Приготовление жидкостекольной смеси осуществляли в вертикальном лопастном смесителе. Масса замеса – 0,5 кг. Время перемешивания – 1 мин.

Таблица 2. Составы смеси

Номер состава	Содержание, мас. %	
	наполнитель (кварцевый песок)	связующее (жидкое стекло) сверх 100%
1	100	6
2	100	5
3	100	4
4	100	3

Результаты экспериментальных исследований

Результаты испытаний, проведенных в соответствии с указанными выше режимами (см. табл. 1), представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3. Прочность образцов, отвержденных по CO_2 -процессу

Номер состава в соответствии с табл. 2	Прочность на растяжение, МПа	Прочность на сжатие, МПа
1	0,243	1,23
2	0,204	1,49
3	0,114	1,06
4	0,057	0,37

Таблица 4. Прочность образцов, отвержденных при вакуумировании

Номер состава в соответствии с табл. 2	Время выдержки, мин	Прочность на растяжение, МПа	Прочность на сжатие, МПа
1	20	0,183	3,84
	30	0,256	4,27
	40	0,301	4,53
2	20	0,128	5,48
	30	0,194	5,74
	40	0,542	6,44
3	20	0,079	3,56
	30	0,221	3,78
	40	0,600	4,13
4	20	0,378	1,45
	30	0,553	1,22
	40	0,551	1,61

Результаты прочностных испытаний образцов, отвержденных в вакууме, приведены на рис. 2, 3.

Сравнение результатов испытаний образцов, отвержденных различными методами, на прочность при растяжении показано в виде гистограмм на рис. 4.

Результаты испытаний показывают, что прочность образцов, отвержденных под вакуумом, почти вдвое превышает прочностные показатели образцов, отвержденных на воздухе и по CO_2 -процессу. В то же время их прочность значительно уступает образцам, отвержденным тепловой сушкой, однако при этом удельные энергозатраты на отверждение вакуумом в 10–20 раз ниже затрат на тепловую сушку.

Механизм процесса набора прочности образца под вакуумом можно представить следующим образом: при снижении давления в рабочей камере вода, содержащаяся в коллоидном растворе, которым является жидкое стекло, вследствие снижения парциального давления в объеме образца активно выделяется из связующего и испаряется, раствор коагулирует, образуя твердый каркас силиката натрия ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot aq$), обеспечивающий требуемую прочность смеси.

Отличие прочности образцов, полученных при различных методах отверждения, объясняется различием образующихся продуктов: когезионная прочность силиката натрия выше прочности геля кремниевой кислоты ($2\text{Si}(\text{OH})_4 \cdot aq$), формирующего прочность жидкостекольной смеси в результате продувки углекислым газом. Снижению прочности смеси, полученной по CO_2 -процессу, способствует также образование карбонатов и бикарбонатов натрия (Na_2CO_3 и NaHCO_3) [7].

Результаты исследования образцов, отвержденных в вакууме, на выбиваемость приведены на рис. 5.

Следует отметить, что, несмотря на большую прочность, образцы из базовой смеси (с 5% жидкого стекла), отвержденные в вакууме, имели лучшую выбиваемость, чем образцы, полученные по CO_2 -процессу (рис. 6). При снижении содержания жидкого стекла в смеси до 3% и сохранении прочности на уровне образцов, полученных по CO_2 -процессу, работа выбивки для образцов, отвержденных в вакууме, снизилась в 1,5 раза.

Разница в работе, затрачиваемой на выбивку, возможно объясняется различной скоростью спекания основных компонентов, образующих каркас жидкостекольной смеси при различных методах отверждения (скорость спекания силикагеля выше, чем у силиката натрия).

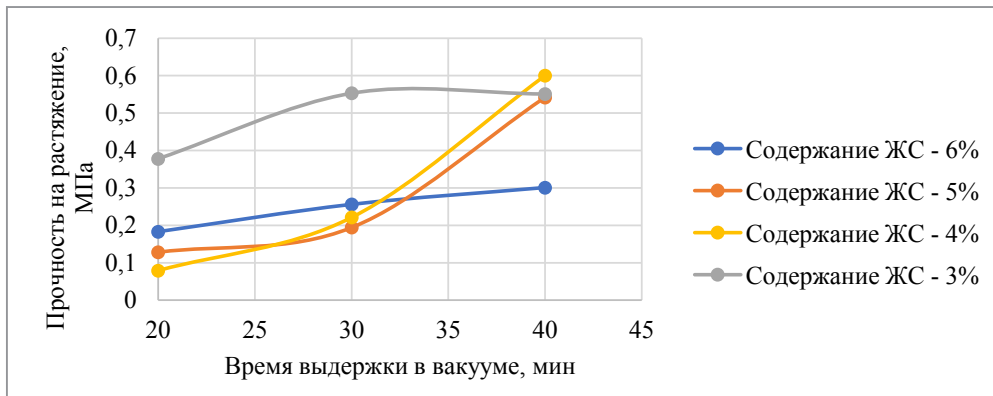


Рис. 2. Прочность на растяжение образцов жидкостекольной смеси при различном времени вакуумирования

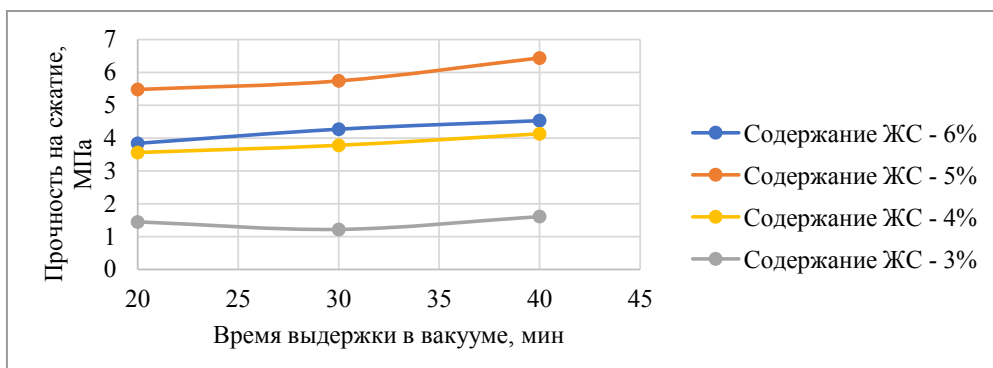


Рис. 3. Прочность на сжатие образцов при различном времени вакуумирования

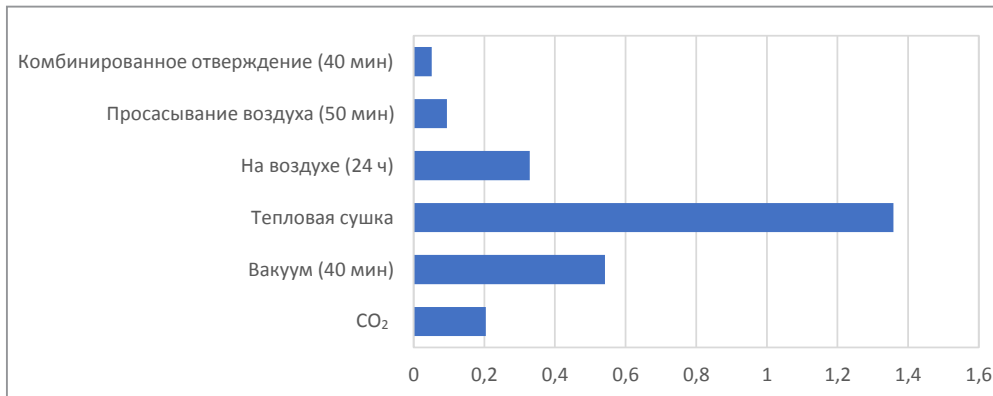


Рис. 4. Диаграммы сравнения прочности жидкостекольной смеси при разных условиях отверждения

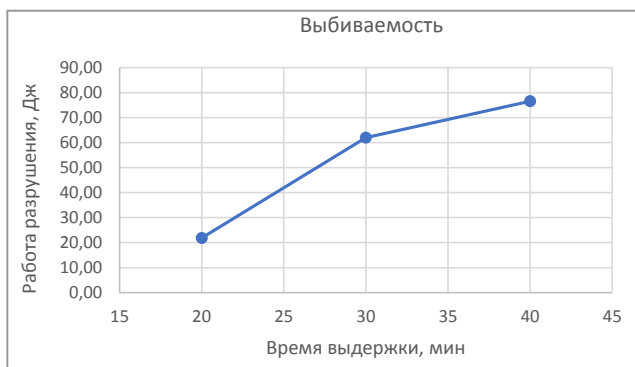
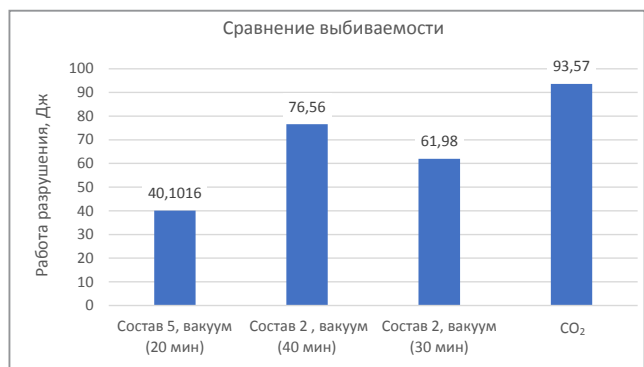


Рис. 5. Работа выбивки при различном времени отверждения образцов в вакууме

Рис. 6. Сравнение энергии, затраченной на разрушение образца, отвержденного по CO₂-процессу, и образцов, отвержденных в вакууме при различном времени обработки и содержании жидкого стекла

Выводы

Применение вакуума позволяет не только резко ускорить процессы отверждения смесей на силикатном связующем (в 30–50 раз относительно процессов естественной сушки), но и обеспечивает достижение более высокой прочности в отвержденном состоянии (в 1,5–2,0 раза).

Отверждение в вакууме можно рассматривать как альтернативу традиционным способам изготовления форм и стержней из жидкостекольных смесей продувкой углекислым газом и методом тепловой сушки: уступая CO_2 -процессу по интенсивности, вакуумирование обеспечивает более высокую объемную прочность (на сжатие – в 4–6 раз, на разрыв – в 2–3 раза), меньшую осыпаемость и, что самое важное, улучшение выбиваемости смеси; образцы, отвержденные в вакууме, уступают по прочности образцам, полученным тепловой сушкой, но при этом в 2 раза сокращается время отверждения и более чем на порядок снижаются удельные энергозатраты.

Отверждение в вакууме при сохранении требуемого уровня прочности позволяет почти в 2 раза снизить содержание связующего (с 5–6 до 3–3,5%) и соответственно значительно облегчить выбиваемость жидкостекольной смеси (в 1,5 раза по сравнению с выбиваемостью базовой смеси, отвержденной углекислым газом).

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности и перспективности применения вакуума в процессах отверждения жидкостекольных смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Болдин, А. Н.** Экология литейного производства: учеб. пособие для вузов / А. Н. Болдин [и др.]. Брянск: БГТУ, 2001. 315 с.
2. **Кукуй, Д. М.** Теория и технология литейного производства. Формовочные материалы и смеси / Д. М. Кукуй, Н. В. Андрианов. Минск: БНТУ, 2005. 391 с.
3. **Корнеев, В. И.** Растворимое и жидкое стекло / В. И. Корнеев, В. В. Данилов. Санкт-Петербург: Стройиздат, 1996. 216 с.
4. **Гальперин, Н. И.** Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2-х кн. / Н. И. Гальперин. М.: Химия, 1981. 812 с.
5. Перспективы применения вакуумирования для отверждения жидкостекольных смесей / Ю. Ю. Гуминский, С. Л. Ровин, О. А. Русевич // Литейщик России. 2021. № 1. С. 34–37.
6. **Лясс, А. М.** Фазовые превращения в ЖСС с жидким стеклом при высоких температурах и их связь с технологическими свойствами / А. М. Лясс. М.: Машиностроение, 1979. 207 с.
7. **Илларионов, И. Е.** Жидкостекольные смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом / И. Е. Илларионов, Н. В. Петрова // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р. Е. Алексева. 2011. № 2 (87). С. 208–213.

REFERENCES

1. **Boldin A. N. et al.** *Jekologija litejnogo proizvodstva*. [Foundry ecology]. Brjansk, BG TU Publ., 2001. 315 p.
2. **Kukuj D. M., Andrianov N. V.** *Teorija i tehnologija litejnogo proizvodstva. Formovochnye materialy i smesi* [Foundry theory and technology. Molding materials and mixtures]. Minsk, BNTU Publ., 2005. 391 p.
3. **Korneev V. I., Danilov V. V.** *Rastvorimoe i zhidkoe steklo* [Soluble and liquid glass]. Sankt-Peterburg, Strojizdat Publ., 1996. 216 p.
4. **Gal'perin N. I.** *Osnovnye processy i apparaty himicheskoj tehnologii. V dvuh knigah* [Basic processes and apparatuses of chemical technology. In two books]. Moscow, Himija Publ., 1981. 812 p.
5. **Guminskij Ju. Ju., Rovin S. L., Rusevich O. A.** Perspektivy primeneniya vakuumirovaniya dlja otverzhenija zhidkostekol'nyh smesej [Application possibility of vacuum for hardening of liquid glass mixtures]. *Litejshhik Rossii = Foundryman of Russia*, 2021, no. 1, pp. 34–37.
6. **Ljass, A. M.** *Fazovye prevrashhenija v ZhSS s zhidkim steklom pri vysokih temperaturah i ih svjaz' s tehnologicheskimi svojstvami* [Phase transformations in fluid self-hardening mixtures with liquid glass at high temperatures and their relationship with technological properties]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 207 p.
7. **Illarionov I. E., Petrova N. V.** Zhidkostekol'nye smesi, otverzhaemye produvkoy uglekislym gazom [Liquid glass mixtures hardened by carbon dioxide purge] *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. R. E. Alekseeva = Proceedings of the Nizhny Novgorod State University named after R. E. Alekseev*, 2011, no. 2, pp. 208–213.