



УДК 544.022.823

## Физико-химические основы формирования структуры гипсовых вяжущих материалов

Р. И. Кузьмина, Н. С. Ержанова, З. Х. Кунашева



Кузьмина Раиса Ивановна, доктор химических наук, профессор кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, kuzminaraisa@mail.ru

Ержанова Нургуль Сандибаевна, аспирант 1-го курса Института химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, nurgul.yerzhanova@mail.ru

Кунашева Зарипа Хайроллиевна, кандидат химических наук, доцент кафедры химии естественно-географического факультета, заведующий исследовательской лабораторией экологии и биогеохимии, Западно-Казахстанский государственный университет имени М. Утемисова, г. Уральск, Казахстан, kunasheva@mail.ru

В статье показаны результаты исследования композиционных материалов, полученных модификацией минеральных ресурсов с активными минеральными компонентами, что является главным направлением производства новых высококачественных материалов. В ходе данной работы были получены вяжущие материалы на основе строительного гипса и карбонатного бурового шлама, а также замедлителя срока схватывания. Исследованы физико-химические свойства, структура системы, фазовое влияние модификатора на структуру и твердение полученных новых материалов. Анализ результатов исследований показал, что повышение степени наполнения строительного гипса приводит к уменьшению его водопоглощения, но водоудерживающая способность и влажность возрастают, что позволяет получить вяжущие с хорошей водостойкостью. Введение в состав композита бурового отхода позволяет получить гладкую поверхность образцов, структура которой является бездефектной, максимально плотной из-за полифракционного состава шлама, который способствует созданию структуры матричной фазы вяжущего. Также изучены термодинамические характеристики процесса гидратации полуводного гипса.

**Ключевые слова:** буровой шлам, фаза, коэффициент размягчения, теплопроводность, пористость, прочность на изгиб и сжатие.

Поступила в редакцию: 24.12.2019 / Принята: 10.01.2020 / Опубликовано: 31.08.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-3-300-307>

На сегодня одним из наиболее важных направлений экономики мира является производство новых материалов. Данный комплекс бурно развивается и набирает обороты, в частности

многокомпонентные системы на минеральной основе выходят на совершенно новый уровень. К числу основных требований, предъявляемых к данной продукции, относятся повышение качества, рациональное природопользование и охрана окружающей среды. Одним из путей решения этой задачи является широкое внедрение технологий использования отходов производства. Мировой и отечественный опыт применения отходов показывает их высокую эффективность и преимущества. Расширение области применения изделий и конструкций, изготовленных на основе строительного гипса, возможно лишь при условии улучшения их физико-механических и эксплуатационных свойств [1].

Эффективность использования гипсовых строительных материалов обусловлена простотой и экономичностью производства самих гипсовых вяжущих веществ. На производство 1 т этого вяжущего требуется соответственно в 4–5 раз меньше топлива и электроэнергии, чем на производство тонны портландцемента [2].

### Материалы и методы

В статье описывается синтез оптимального состава композиционных материалов на основе минеральных ресурсов и наполнителей местного происхождения.

Композиционные системы и материалы на его основе получали перемешиванием предварительно подготовленных компонентов. Минеральные и химические добавки подвергались сушке в лабораторном сушильном шкафу марки 2В-151 при температуре не более 60° С.

Изучение основных свойств строительного гипса и композиций на его основе проводили согласно ГОСТ 23789-79 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний».

Для определения сроков схватывания применяется прибор «Вика» и используется гипсовое тесто стандартной консистенции. Сущность метода состоит в определении времени от начала контакта гипсового вяжущего с водой до начала и конца схватывания теста.

Водопоглощение материала определяют на трех образцах, предварительно высушенных до



постоянной массы при температуре 318–328 К (45–55° С). Образцы взвешивают, помещают в горизонтальном положении в ванну и заливают до половины водой. Через 2 ч их заливают водой полностью и выдерживают еще 2 ч. После этого образцы извлекают из воды, обтирают влажной тканью и взвешивают.

Теплопроводность рассчитывали по формуле В. П. Некрасова:

$$\lambda = 1.16\sqrt{0.0196 + 0.22d^2} - 0.16, \quad (1)$$

где  $d = \rho_{\text{ср}}/\rho_{\text{вода}}$ .

Испытание образцов на прочность проводили на маятниковой испытательной машине WMP-10 при скорости нагружения 0,1 МПа/с. Предел прочности при изгибе определяли на испытательной машине МИИ-100.

В качестве исходного сырья использовали строительный гипс марки Г4 – Г6 производства ТОО «Alina GM» (Западно-Казахстанская об-

ласть), в качестве техногенного наполнителя – активированный минеральный порошок из карбонатного бурового шлама Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения (Западно-Казахстанская область) и замедлитель схватывания – борную кислоту.

### Результаты и их обсуждение

Авторы [3, 4] отмечают положительное влияние активного минерального компонента на структурно-физические, физико-механические и технико-эксплуатационные характеристики композиционного наноструктурированного гипсового вяжущего. На основании проведенных исследовательских работ вышеуказанных авторов получены композиционные материалы (КМ), в составе которых количество активированного карбонатного бурового шлама варьировалось от 5 до 20%. Компонентный состав вяжущих представлен в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Химический и количественный состав гипсовых композиционных материалов**  
**Chemical and quantitative composition of gypsum composite materials**

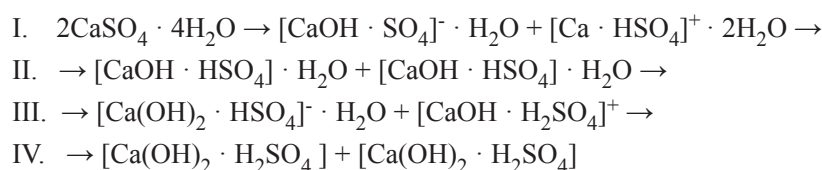
№	Композиционные материалы / Composite materials	$m_{\text{общ}}, \text{ г} / m_{\text{general}}, \text{ г}$	$m_{\text{гипс}}, \text{ г} / m_{\text{gypsum}}, \text{ г}$	$m_{\text{шлам}}, \text{ г} / m_{\text{sludge}}, \text{ г}$
1	Гипс 100% / Gypsum 100%	100	100	0
2	Гипс 95% / Gypsum 95% Карбонатный шлам 5% / Carbonate sludge 5%	100	94	5
3	Гипс 90% / Gypsum 90% Карбонатный шлам 10% / Carbonate sludge 10%	100	89	10
4	Гипс 85% / Gypsum 85% Карбонатный шлам 15% / Carbonate sludge 15%	100	84	15
5	Гипс 80% / Gypsum 80% Карбонатный шлам 20% / Carbonate sludge 20%	100	79	20

Примечание. Содержание борной кислоты составляет 1% от общей массы КМ.  
Note. The content of boric acid is 1% of the total mass of CM.

Следует отметить, что введение в состав композита бурового отхода позволяет получить гладкую, без видимых невооруженным глазом пор поверхность образцов. Объяснение такого эффекта возможно при условии рассмотрения комплексного воздействия техногенного наполнителя на гипсовую вяжущую систему [5]. В особенности из-за полифракционного состава шлама при его введении в гипсовую систему рассматривается воздействие как на микро-, так и на наноуровне. Частицы максимального

размера работают в композиционной системе как микронаполнитель, который способствует созданию максимально плотной бездефектной структуры матричной фазы вяжущего (рис. 1).

В соответствии с приведенной схемой каждая молекула воды связана через ион кислорода с кальцием и водородными связями через ионы водорода с кислородом сернокислотных тетраэдров. Условно можно выделить несколько стадий разрушения водородных связей:



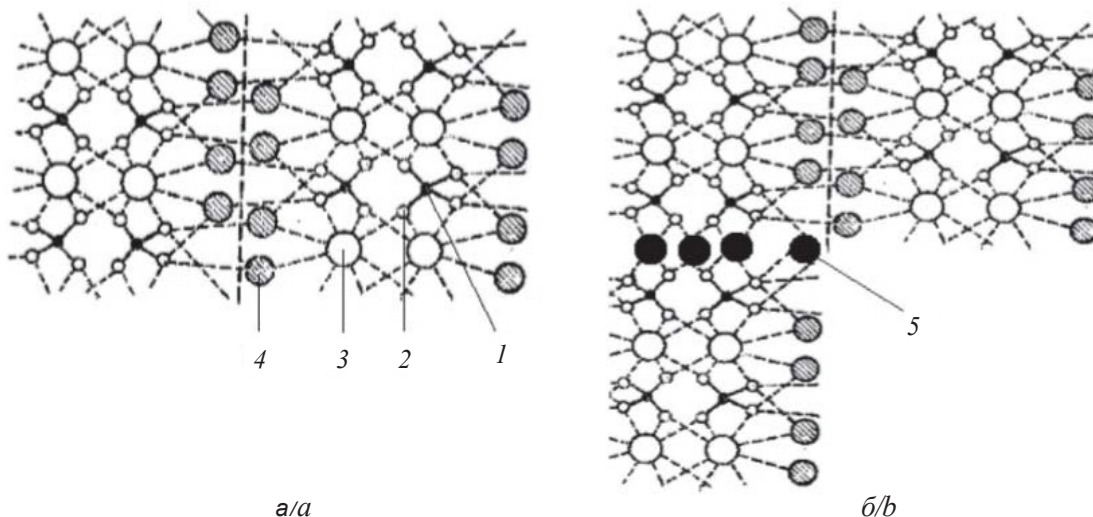


Рис. 1. Кристаллические структуры: а –  $\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; б – материалы с техногенными наполнителями; 1 –  $\text{S}^{6+}$ , 2 –  $\text{O}^{2-}$ , 3 –  $\text{Ca}^{2+}$ , 4 –  $\text{H}_2\text{O}$ , 5 – частицы наполнителя  
 Fig. 1. Crystal structure: a –  $\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; b – materials with man-made fillers; 1 –  $\text{S}^{6+}$ , 2 –  $\text{O}^{2-}$ , 3 –  $\text{Ca}^{2+}$ , 4 –  $\text{H}_2\text{O}$ , 5 – filler particles

Образующиеся в результате последовательных структурных преобразований ионы  $\text{CaOH}^+$ ,  $\text{HSO}_4^-$  не являются устойчивыми, поэтому воздействие техногенного наполнителя в системе происходит как на уровне матрицы вяжущего, так и на контактной зоне, что, в свою очередь, приводит к повышению качества и эффективности

гипсовых материалов. В данной структуре активная добавка связывается с двухводным гипсом на контактной или матричной зоне.

Следует предположить, что гладкая поверхность образцов является следствием изменения поровой структуры материала. Количественные данные пористости показаны в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

**Пористость гипсовых вяжущих**  
**Porosity of gypsum binding agents**

№ образца / sample's no.	Пористость, % / Porosity, %			
	П <sub>общ</sub> / P <sub>general</sub>	П <sub>откр</sub> / P <sub>open</sub>	П <sub>закр</sub> / P <sub>close</sub>	П <sub>микро</sub> / P <sub>micro</sub>
1	48,15	25,71	5,42	1,41
2	46,94	24,13	6,91	1,69
3	43,79	22,81	7,59	1,94
4	42,58	21,94	8,18	2,36
5	37,12	18,68	8,41	3,12

Рациональное количество карбонатного шлама позволяет снизить открытую пористость гипсового камня до 7%. Изменяя вид, дисперсность и количество наполнителя, можно управлять свойствами вяжущего и оказывать влияние на структуру затвердевшего материала. Понижение пористости композитов за счет увеличения количества шлама способствует интенсивному улучшению его свойств, таких как прочность, теплопроводность и т. п. С повышением количества водоудерживающей добавки не наблюдается снижения прочности раствора и

повышается его адгезия. Это объясняется тем, что добавка, проникая в поры раствора, практически армирует гипсовый камень. Жесткий каркас затвердевшего раствора становится более пластичным.

На рис. 2 видно, что с повышением концентрации карбонатного шлама увеличивается прочность на изгиб и сжатие. За счет снижения водопоглощения материала сокращается водогипсовое соотношение, что влияет на размеры кристаллов образующегося дигидрата – чем оно больше, тем крупнее кристаллы. Скорость

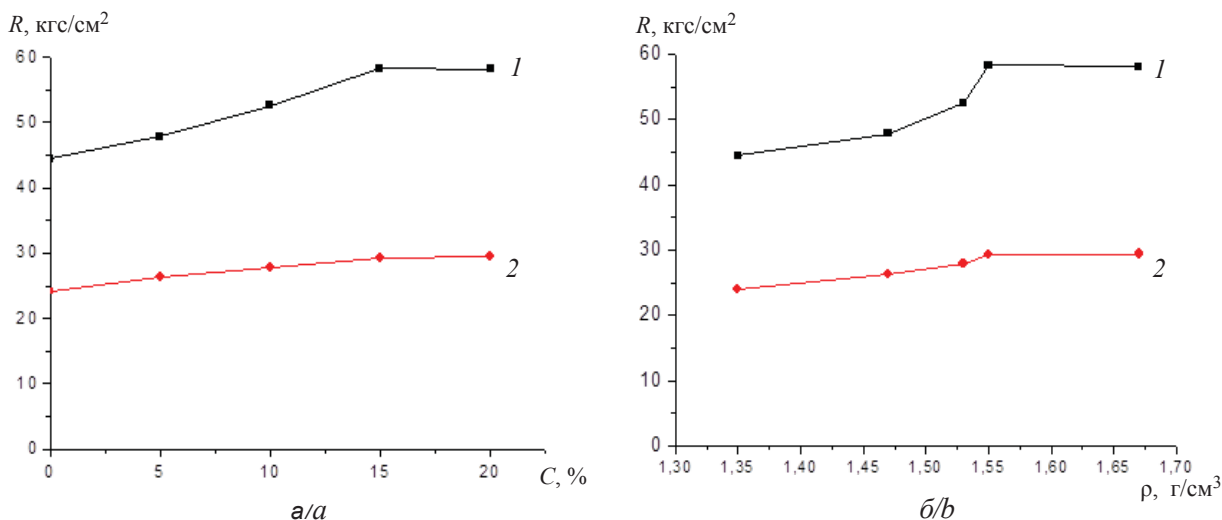


Рис. 2. Зависимость прочности композиции: *a* – от концентрации карбонатного шлама; *b* – от плотности материала; 1 – прочность на сжатие, 2 – прочность на изгиб  
 Fig. 2. The dependence of the composition strength: *a* – on the concentration of carbonate sludge; *b* – on the material density; 1 – compressive strength, 2 – bending strength

зарождения кристаллов находится в зависимости от поверхностной энергии. Чем меньше поверхностная энергия на границе кристалла с раствором, тем устойчивее система.

С позиции законов термодинамики кристаллизационные контакты вследствие сформированной кристаллической решетки обладают избытком свободной энергии, а следовательно, и повышенной растворимостью [6, 7].

Также одним из важнейших показателей гипсовых вяжущих является теплопроводность – способность материала передавать тепло через свою толщину за счет разницы температур на ограничивающих поверхностях. Это свойство

характеризуется коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  (Вт/(м·°С)). Теплопроводность гипсовых композиционных материалов связана с составом, структурой, текстурой, плотностью, влажностью, температурой окружающей среды.

В сравнительной диаграмме (рис. 3) с увеличением плотности материала теплопроводность снижается, так как теплопроводность воздуха  $\lambda_{\text{возд}} = 0.023$  Вт/(м·°С) (при  $t = 20^\circ \text{C}$ ) всегда меньше теплопроводности твердого вещества, из которого состоит строительный материал.

Ниже приведены результаты экспериментальных работ по определению физико-химических и механических свойств (табл. 3).

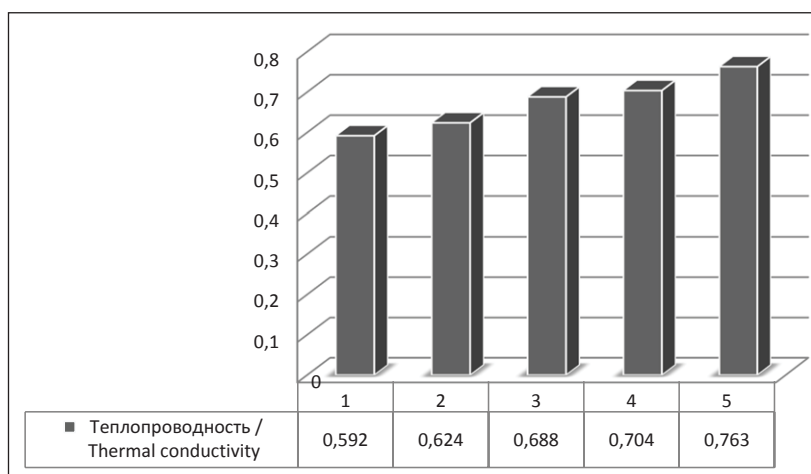


Рис. 3. Сравнительная диаграмма коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) композиционных материалов

Fig. 3. Comparative diagram of the thermal conductivity coefficient ( $\lambda$ ) of composite materials



Таблица 3 / Table 3

**Физико-технические свойства композиционной системы**  
**Physical and technical properties of the composite system**

№ образца / Sample's №	Свойства композиции / Properties of the composition		
	Водопоглощение W, % / Water absorption W, %	Влажность W <sub>с</sub> , % / Humidity W <sub>с</sub> , %	Водостойкость K <sub>размягчения</sub> / Water resistance K <sub>softening</sub>
<b>1</b>	16,97	0,60	0,62
<b>2</b>	15,84	0,68	0,68
<b>3</b>	13,28	0,70	0,77
<b>4</b>	12,42	0,80	0,85
<b>5</b>	10,02	0,90	0,79

Принцип действия минеральной добавки, т. е. бурового шлама, основывается на рассеянии статических зарядов и пространственной стабилизации частиц вяжущего вещества, что приводит к высокоэффективному диспергированию и дефлокуляции [8].

Рост числа носителей заряда в вяжущей системе связан не только с растворением минеральной добавки, но и с диссоциативной адсорбцией молекул воды на активных центрах твердой фазы. Таким образом, адсорбируясь на гидратирующихся зернах вяжущего, добавка удлиняет сроки схватывания и уменьшает водопоглощение, что обуславливает рост прочностных показателей. Причиной повышения водостойкости является положительное действие минеральной добавки, которое заключается в том, что частицы редиспергируемых порошков распределяются в структуре материала, формируя непрерывный полимерный каркас. Исходя

из этих данных можно сделать вывод, что на водостойкость гипсового камня значительное влияние оказывают объем его пористости и характеристика размеров пор.

Водостойкость вяжущих материалов характеризуется коэффициентом размягчения  $K_{разм}$ . Водостойкость гипсовых вяжущих веществ оценивается по коэффициенту размягчения, согласно которому гипсовые вяжущие делятся на: 1) неводостойкие (НВ) –  $K_{разм} < 0,45$ ; 2) средней водостойкости (СВ) –  $0,45 \leq K_{разм} \leq 0,6$ ; 3) повышенной водостойкости (ПВ) –  $0,6 \leq K_{разм} \leq 0,8$ ; 4) водостойкие (В) –  $K_{разм} > 0,8$ . Сравнительный анализ результатов (см. табл. 3) с литературными данными показывает, что образец № 4, в составе которого содержится 15% карбонатного шлама, является водостойким.

В связи с полученными данными с целью замедления схватывания получены еще 5 образцов (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

**Химический и количественный состав гипсовых композиционных материалов**  
**Chemical and quantitative composition of gypsum composite materials**

№ образца / Sample's №	$m_{общ}$ , г / $m_{general}$ , g	$m_{гипс}$ , г / $m_{gypsum}$ , g	$m_{борная\ кислота}$ , г / $m_{boric\ acid}$ , g
<b>1</b>	100	84	1
<b>2</b>		83	2
<b>3</b>		82	3
<b>4</b>		81	4
<b>5</b>		80	5

Примечание. Количество бурового шлама составляет 15% общей массы композиции.  
 Note. The amount of drilling sludge is 15 % of the total mass of the composition.

Варьирование замедлителя схватывания от 1 до 5% влияет на твердение гипсовой системы.

Твердеющие вяжущие вещества минерального происхождения ведут себя подобно слабым электролитам. Изучая влияние слабых кислот на

минеральную систему, можно контролировать процесс гидратации и твердения [9].

В процессе гидратации гипсовых вяжущих происходит изменение объема, температуры и давления внутри системы. При этом изменя-



ется состав раствора. Такую систему можно характеризовать химическим потенциалом  $\mu$  [10]. Химические потенциалы представляют собой частные производные характеристических функций по числу молей данного компонента системы при постоянных значениях независимых параметров и количества всех остальных компонентов:

$$\mu_1 = \left(\frac{\partial U}{\partial n_1}\right) V, S, n_2, n_3 \dots, \quad (2)$$

$$\mu_1 = \left(\frac{\partial F}{\partial n_1}\right) V, T, n_2, n_3 \dots, \quad (3)$$

$$\mu_1 = \left(\frac{\partial H}{\partial n_1}\right) P, S, n_2, n_3 \dots, \quad (4)$$

$$\mu_1 = \left(\frac{\partial G}{\partial n_1}\right) P, T, n_2, n_3 \dots, \quad (5)$$

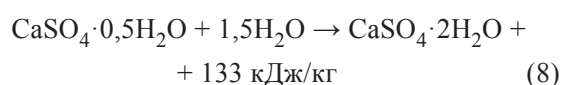
Химический потенциал добавок можно представить как фактор интенсивности химической энергии данного вещества в системе. Химическую энергию можно рассматривать как произведение фактора интенсивности на фактор емкости. Фактором емкости в данном случае будет число молей или концентрация данного вещества. Приращение химической энергии можно представить в виде  $\mu_1 = \partial n_1$ ,

следовательно, введение добавок изменяет состояние равновесия системы и происходит превращение энергии:

$$\sum \mu_i dn_i \neq 0. \quad (6)$$

Таким образом, химический потенциал является мерой изменения характеристической функции при постоянных параметрах и массах всех веществ, за исключением массы того компонента, количество которого изменяется в системе. Следовательно, химический потенциал можно рассматривать как тепловой эффект:

$$(Q_v) = -\Delta U \text{ или } (Q_p) = \Delta H; \quad (7)$$



Борная кислота представляет собой эффективный замедлитель для гипсовых вяжущих [11]. Хотя он и не является универсальным замедлителем, но, благодаря своим особенностям, оказывает значительный положительный эффект при применении: минимальное влияние на снижение прочности гипса, малая чувствительность к изменению содержания воды (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Сроки схватывания композиционного материала  
Setting terms of the composite material

Сроки схватывания / Setting time	№ образца / Sample's No.				
	1	2	3	4	5
До $\tau_{\text{начало}}$ , минут / Until $\tau_{\text{beginning}}$ , minute	4	6	9	9	9
После $\tau_{\text{конец}}$ , минут / After $\tau_{\text{end}}$ , minute	17	19	21	21	20

Как можно заметить, особенностью борной кислоты является то, что она изменяет время от начала и до окончания схватывания гипсового раствора, этот промежуток отличается от чистого гипса и составляет 12 минут, что делает ее незаменимой для гипсовых штукатурок при необходимости срезки.

Таким образом, по результатам исследования было установлено, что композиционный материал, содержащий 85% гипса, 15% бурового шлама и 3% борной кислоты – оптимальный состав для водостойких, прочных и эффективных строительных материалов, используемых в строительстве зданий, внешней и внутренней отделке помещений в связи с положительным влиянием нанодобавки на кристаллическую структуру.

### Список литературы

1. Едаменко А. Основные критерии при проектировании многофазовых гипсовых вяжущих // Альманах современной науки и образования. 2012. № 12 (67), ч. 2. С. 28–30.
2. Ферронская А. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): справочник. М.: АСВ, 2004. 485 с.
3. Войтович Е., Жерновский И., Череватова А. Новые виды гипсовых вяжущих с применением наномодификаторов // Сухие строительные смеси. 2011. № 3. С. 18–19.
4. Войтович Е., Жерновский И., Череватова А., Строкова В. Особенности фазообразования в композиционном наноструктурированном гипсовом вяжущем // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 9–11.



5. Деревянко В., Мороз Л., Мороз В., Кушнерова Л., Гришко А. Наномодифицированное гипсовое вяжущее // Строительство, материаловедение, машиностроение. 2017. № 96. С. 73–78.
6. Mchedlov-Petrosjan O. Chemistry of nonorganic construction materials. М. : Stroyizdat, 1988. 304 p.
7. Токарев Ю., Головин Д., Бурьянов А., Хуйганг Тяю, Тао Ду. О механизме влияния активных добавок на основе магнезита и углеродных нанотрубок на структуру и свойства ангидритового вяжущего // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 56–62.
8. Лукьянова А., Старостина И. Строительные композиционные материалы на основе модифицированных гипсовых вяжущих, полученных из отходов производства // Fundamental Research. 2013. № 4. С. 818–822.
9. Романенков В., Петюшик Е. Физико-химические основы гидратационного твердения порошковых сред. Минск : Белорус. наука, 2012. 197 с.
10. Деревянко В., Чумак А., Тельянов В., Кондратьева Н. Наномодификация структуры гипсовых вяжущих // Вестник ПГАСА. 2012. № 6. С. 31–36.
11. Литвиненко С. Применение замедлителя схватывания для гипсовых вяжущих Retardan 225P // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 26–28.

#### Образец для цитирования:

Кузьмина Р. И., Ержанова Н. С., Кунашева З. Х. Физико-химические основы формирования структуры гипсовых вяжущих материалов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20, вып. 3. С. 300–307. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-3-300-307>

#### Physico-Chemical Principles of Structure Formation of Gypsum Binding Materials

R. I. Kuzmina, N. S. Yerzhanova, Z. Kh. Kunasheva

Raisa I. Kuzmina, <https://orcid.org/0000-0001-6850-4511>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [kuzminaraisa@mail.ru](mailto:kuzminaraisa@mail.ru)

Nurgul S. Yerzhanova, <https://orcid.org/0000-0001-8687-9690>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [nurgul.yerzhanova@mail.ru](mailto:nurgul.yerzhanova@mail.ru)

Zaripa Kh. Kunasheva, <https://orcid.org/0000-0002-16145939>, West Kazakhstan State University named after M. Utemisov, 162 N. Nazarbaeva Ave., Ural'sk, Kazakhstan, [kunasheva@mail.ru](mailto:kunasheva@mail.ru)

The article shows the results of the study of composite materials obtained by the modification of mineral resources with active mineral components, which is the main direction in the production of new materials of high quality. In this work, binding materials were obtained on the basis of construction gypsum and carbonate drilling sludge, which is a retarder of the setting time as well. The physical and chemical properties, the structure of the system, and the phase influence of the modifier on the structure and hardening of the obtained new materials were investigated. The analysis of research results showed that increasing the filling rate of construction gypsum led to decrease in its water absorption, whereas water-holding capacity and humidity increased, which allowed us to get binders with good water resistance. The introduction of drilling cuttings into the composite composition allowed us to obtain a smooth surface of the samples, the structure of which is defect-free and as dense as possible due to the polyfractional composition of the sludge, which contributed to the creation of the structure of the matrix phase of the binder. The thermodynamic characteristics of the hydration process of semi-aqueous gypsum were also studied.

**Keywords:** drill cuttings, phase, softening coefficient, heat conductivity, porosity, bending and compression strength.

Received: 24.12.2019 / Accepted: 10.01.2020 /

Published: 31.08.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

#### References

1. Edamenko A. The main criteria in the design of multi-phase gypsum binders. *Almanakh of Modern Science and Education*, 2012, no. 12 (67), pt. 2, pp. 28–30 (in Russian).
2. Ferronskaya A. *Gipsovyye materialy i izdeliya (proizvodstvo i primeneniye): spravochnik* [Plaster materials and products (production and use): reference]. Moscow, ACB Publ., 2004. 485 p. (in Russian).
3. Voitovich E., Zhernovsky I., Cherevatova A. New types of gypsum binders with applicable nanomodifiers. *Dry Building Mixes*, 2011, no. 3, pp. 18–19 (in Russian).
4. Voitovich E., Zhirinovsky I., Cherevatova A., Strokova V. Features of phase formation in composite nanostructured gypsum binder. *Building Materials*, 2012, no. 7, pp. 9–11 (in Russian).
5. Derevyanko V., Moroz L., Moroz V., Kushnerova L., Grishko A. Nanomodified gypsum binder. *Construction, Materials Science, Mechanical Engineering*, 2017, no. 96, pp. 73–78 (in Russian).
6. Mchedlov-Petrosjan O. *Chemistry of Nonorganic Construction Materials*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 304 p.
7. Tokarev Yu., Golovin D., Buryanov A., Hugang Tsho, Tao Du. On the mechanism of influence of active additives based on magnesite and carbon nanotubes on the structure and properties of anhydrite binder. *Building Materials*, 2015, no. 2, pp. 56–62 (in Russian).
8. Lukyanova A., Starostina I. Construction composite



- materials based on modified gypsum binders obtained from production waste. *Fundamental Research*, 2013, no. 4, pp. 818–822 (in Russian).
9. Romanenkov V., Petushik E. *Fiziko-khimicheskiye osnovy gidratatsionnogo tverdeniya poroshkovykh sred* [Physico-chemical basis of hydration hardening powder media]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2012. 197 p. (in Russian).
  10. Derevyanko V., Chumak, A., Talanov V., Kondratyeva N. Nano-modification of structure of gypsum binding materials. *Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2012, no. 6, pp. 31–36 (in Russian).
  11. Litvinenko S. Application of setting retarder for gypsum binders Retardan 225P. *Building Materials*, 2012, no. 7, pp. 26–28 (in Russian).

---

**Cite this article as:**

Kuzmina R. I., Yerzhanova N. S., Kunasheva Z. Kh. Physico-Chemical Principles of Structure Formation of Gypsum Binding Materials. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 300–307 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-3-300-307>

---