

PRODUCTION OF PROPPANTS BASED ON FERROALLOY PRODUCTION WASTE AND ASSESSMENT OF THEIR OPERATIONAL CHARACTERISTICS

K.A. Kadirbekov^{*1}, M.T. Oshakbayev¹, N.A. Buzayev¹, N.N. Oralbayev¹, G.G. Seitkhal¹,
S. Keneges¹, N.A. Shadin², A.Zh. Aburov^{3,4}, R. Kaiynbayeva¹,
A.A. Yespenbetov¹, M.N. Baimbetov¹

¹JSC "A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences", Almaty, Kazakhstan

²NJSC Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

³LLP "Scientific and Engineering Research Center ERG", Astana, Kazakhstan

⁴JSC "Kazakh-British Technical University" (KBTU), Almaty, Kazakhstan

^{*}Corresponding author e-mail: k.kadirbekov@ihn.kz

Abstract. The possibility of producing proppants from ferroalloy production waste (RFKh and VUFKh slags) using liquid glass and a polymer coating (PVA) was investigated. It was found that VUFKh slag, rich in strength-forming phases (90.5%), is the most promising raw material. Proppants obtained from VUFKh slag achieved standard sphericity values, but do not meet the requirements of GOST 54571-2011 for crush resistance (20% excess of the standard) and solubility in HCl. The technological feasibility of producing magnesium silicate proppants, suitable for use in medium-pressure reservoirs, has been substantiated, with the need for further optimization of the mixture composition and firing regime to achieve full compliance with GOST. The use of this waste is recognized as economically viable.

Keywords: Proppants, Ferroalloy Slags, Hydraulic Fracturing, Operational Characteristics, Magnesium Silicates, Technogenic Raw Materials.

<i>Kadirbekov Kairat Adyrbekovich</i>	<i>Doctor of Chemical Sciences</i>
<i>Oshakbayev Mels Tleuberdievich</i>	<i>Doctor of Technical Sciences</i>
<i>Buzaev Nurdaulet Amanzholovich</i>	<i>Doctoral student PhD</i>
<i>Oralbaev Nursultan</i>	<i>Master</i>
<i>Seitkhal Gulnar</i>	<i>Bachelor</i>
<i>Keneges Sulushash</i>	<i>Bachelor</i>
<i>Shadin Nurgul</i>	<i>PhD</i>

Citation: Kadirbekov K.A., Oshakbayev M.T., Buzayev N.A., Oralbayev N.N., Seitkhal G.G., Keneges S., Shadin N.A., Aburov A.Zh., Kaiynbayeva R., Yespenbetov A.A., Baimbetov M.N. Production of proppants based on ferroalloy production waste and assessment of their operational characteristics. *Chem. J. Kaz.*, **2025**, 4(92), 5-20. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-4.2710-1185.46>

<i>Abyurov Arman Zhumagulovich</i>	<i>Doctoral student PhD</i>
<i>Kaiyynbayeva Raushan</i>	<i>Candidate of Chemical Science</i>
<i>Yespenbetov Asylbek Alibekovich</i>	<i>Doctor of Chemical Sciences</i>
<i>Baimbetov Mizambek</i>	<i>Candidate of Technical Sciences</i>

ПОЛУЧЕНИЕ ПРОПАНТОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ОЦЕНКА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

К.А. Кадирбеков^{*1}, М.Т. Ошакбаев, Н.А. Бузаев¹, Н.Н. Оралбаев¹, Г.Г. Сейтхал¹, С.Кенегес¹, Н.А. Шадин², А.Ж. Абюров^{3,4}, Р.Кайынбаева¹, А.А. Еспенбетов¹, М.Н.Баимбетов¹

¹АО «Институт химических наук им. А.Б.Бектурова», Алматы, Казахстан

² НАО Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан

³ТОО «Научно-инженерный исследовательский центр ERG», Астана, Казахстан

⁴АО «КБТУ», Алматы, Казахстан

Резюме. Исследована возможность получения пропантов из техногенных отходов ферросплавного производства (шлаки РФХ и ВУФХ) с применением жидкого стекла и полимерного покрытия (ПВС). Установлено, что шлак ВУФХ, богатый прочностными фазами (90.5%), является наиболее перспективным сырьем. Полученные пропанты на основе ВУФХ достигли нормативных показателей сферичности, но не соответствуют требованиям ГОСТ 54571-2011 по сопротивлению раздавливанию (20% превышение норматива) и растворимости в HCl. Обоснована технологическая возможность производства магнийсиликатных пропантов, пригодных для применения в пластах со средним давлением, с необходимостью дальнейшей оптимизации состава шихты и режима обжига для достижения полного соответствия ГОСТ. Использование данных отходов признано экономически целесообразным.

Ключевые слова: Пропанты, Ферросплавные шлаки, Гидравлический разрыв пласта, Магнийсиликаты, Эксплуатационные характеристики, Техногенное сырье.

<i>Кадирбеков Кайрат Адырбекович</i>	<i>Доктор химических наук</i>
<i>Ошакбаев Мэлс Тлеубердиевич</i>	<i>Доктор технических наук</i>
<i>Бузаев Нурдаулет Аманжолович</i>	<i>Докторант PhD</i>
<i>Оралбаев Нурсултан</i>	<i>Магистрант</i>
<i>Сейтхал Гулнар</i>	<i>Бакалавр</i>
<i>Кенегес Сулушаш</i>	<i>Бакалавр</i>
<i>Шадин Нургул</i>	<i>PhD</i>
<i>Абюров Арман Жумагулович</i>	<i>Докторант PhD</i>
<i>Кайынбаева Раушан</i>	<i>Кандидат химических наук</i>
<i>Еспенбетов Асылбек Алибекович</i>	<i>Доктор химических наук</i>
<i>Баимбетов Мизамбек</i>	<i>Кандидат технических наук</i>

1. Введение

Топливо-энергетический сектор является ключевым элементом национальной экономики многих стран, включая Республику Казахстан, обладающую значительными запасами углеводородного сырья [1]. В условиях разработки трудноизвлекаемых запасов и естественного истощения месторождений, интенсификация добычи нефти и газа приобретает стратегическое значение. Наиболее востребованной технологией для повышения нефтеотдачи сегодня является гидравлический разрыв пласта (ГРП). Эффективность ГРП напрямую зависит от использования специальных расклинивающих агентов – пропантов, которые обеспечивают необходимую проницаемость трещин [2].

Мировое потребление пропантов демонстрирует устойчивый рост. Например, в соседней России объем потребления пропантов вырос более чем в 2,7 раза за период с 2011 по 2019 год [3]. Рост добычи нефти в Казахстане также требует увеличения объемов использования пропантов [4]. При этом ключевыми требованиями к пропанту являются высокая механическая прочность, химическая стойкость и низкая себестоимость. Мировой рынок пропантов в 2020 году оценивался в более чем 7 млрд долларов США и прогнозируется дальнейший рост [5]. В настоящее время пропанты производятся преимущественно из дорогостоящего алюмосиликатного и магнезисиликатного сырья [6–11].

В качестве альтернативы традиционному сырью рассматриваются техногенные отходы, в частности, шлаки металлургического производства, что позволяет не только снизить себестоимость конечного продукта, но и решить важные экологические проблемы, связанные с утилизацией отходов [12, 13]. Шлаки ферросплавного производства, такие как шлаки высокоуглеродистого и рафинированного феррохрома, являются крупнотоннажными отходами. Например, на Аксуском и Актюбинском заводах ферросплавов накоплены миллионы тонн таких шлаков [14]. Химический состав этих шлаков — содержащих оксиды кремния, алюминия, магния и железа — делает их потенциально пригодными для получения керамических пропантов [15].

Основной целью данного исследования является получение пропантов на основе отходов ферросплавного производства с применением связующих веществ и оценка их эксплуатационных характеристик (например, прочности, сферичности, насыпной плотности) для определения возможности их использования в технологии ГРП.

2. Материалы и методы исследования

Получение пропантов осуществлялось по стандартной схеме: подготовка шихты, грануляция и термическая обработка (обжиг). Исходные шлаки РФХ и ВУФХ тонко измельчались в шаровой мельнице до фракции менее 71 мкм (200 меш). Измельченное сырье смешивалось со связующим веществом в концентрации, варьируемой в диапазоне 3–7 масс. % от сухой массы шлака. Формирование сферических гранул проводилось методом окатывания с использованием ручного тарельчатого гранулятора.

Сырые гранулы после сушки подвергались высокотемпературному обжигу в лабораторной печи при 1100–1400°C с изотермической выдержкой в течение 1–2 часов для достижения максимального уплотнения и формирования прочной керамической структуры.

Для оценки соответствия пропантов требованиям нефтегазовой отрасли использовались следующие методики:

Химический состав определялся методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФлуА). Фазовый состав анализировался полуколичественным методом с помощью рентгенодифрактометрического анализа (РФА) на дифрактометре ДРОН-3 ($CuK\alpha$ -излучением). Интерпретация данных проводилась с использованием картотеки ICDD (PDF2) для определения количественных соотношений кристаллических фаз.

Прочность на сжатие определялась на универсальной испытательной машине Shimadzu AG 100kNх (Япония) при нагрузках 34–69 МПа (5000–10000 psi), согласно методике, регламентирующей оценку сопротивления пропанта разрушению при высоких нагрузках. Объемная плотность и открытая пористость определялись по ГОСТ 26450.1-85. Сферичность и округлость частиц оценивались с использованием оптического микроскопа и специализированного анализатора формы. Насыпная плотность определялась по стандартной методике.

3. Результаты и Обсуждение

Для оценки пригодности отходов ферросплавного производства в качестве сырья для получения пропантов был проведен химический анализ и РФА шлаков, образующихся при производстве рафинированного (РФХ) и высокоуглеродистого (ВУФХ) феррохрома.

В таблице 1 представлен элементный и оксидный состав исследуемых шлаков. Из полученных данных следует, что шлаки РФХ и ВУФХ отличаются количественным содержанием элементов. В шлаке РФХ содержание Mg и Al меньше в 4.9 и 2.6 раза, а количество Si, Cr и Ca, в 1.4; 4.6 и 8.8 раза больше, соответственно, по сравнению со шлаком ВУХВ.

Таблица 1 – Химический состав шлаков

Содержание элементов, %										
O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Fe	S
Шлак РФХ										
48.51	0.24	5.58	3.25	21.58	0.58	14.38	0.26	3.58	2.04	-
Шлак ВУФХ										
45.37	-	27.19	8.37	5.41	0.11	1.63	0.07	0.77	0.80	0.28
Содержание оксидов, %										
	Na ₂ O	Mg O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	SO ₃
Шлак РФХ										
-	0.34	9.93-9.97	4.32-6.71	26.71-50.78	0.78	22.26-51.21	0.49	5.78-6.71	1.13-2.90	-
Шлак ВУФХ										
-	-	37.90-45.33	15.93-17.63	33.30-35.69	0.13	1.25-2.30	0.12-0.65	1.14-5.49	1.04-1.38	0.71

Количество оксида магния в шлаках РФХ (9,93%) и ВУФХ (37,90%) соответствует требованиям ГОСТ 54571-2011 «Пропанты магнезиально-кварцевые». Содержание же оксида кремния ниже нормы, но его можно увеличить используя кремнесодержащие соединения в качестве добавок.

На рисунках 1 и 2 представлены дифрактограммы шлаков РФХ и ВУФХ, а в таблице 2 приведены вещественно-минералогический состав шлаков.

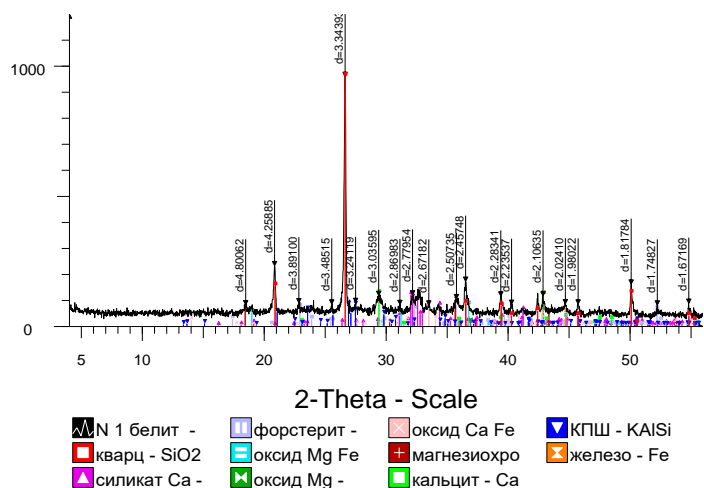


Рисунок 1 – Дифрактограммашлака РФХ.

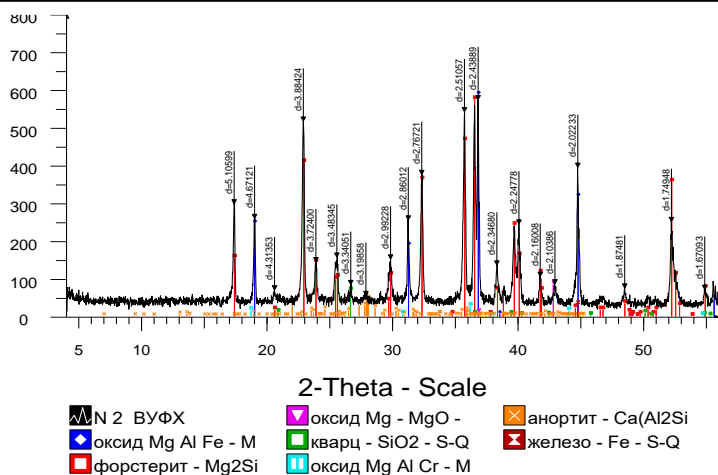


Рисунок 2 – Дифрактограмма шлака ВУФХ.

Таблица 2 – Вещественно-минералогический состав шлаков

Шлак РФХ			Шлак ВУФХ		
Минерал (фаза)	Формула	С, %	Минерал (фаза)	Формула	С, %
кварц	SiO ₂	28.2	кварц	SiO ₂	2.5
силикат Ca	Ca ₂ (SiO ₄)	23.8	-	-	-
форстерит	Mg ₂ SiO ₄	19.3	форстерит	Mg ₂ SiO ₄	42.5
оксид Mg Fe Al	MgFe _{0.2} Al _{1.8} O ₄	7.1	оксид MgAlFe	MgAl _{1.9} Fe _{0.1} O ₄	48.0
оксид Mg	MgO	5.8	оксид Mg	MgO	4.1
оксид CaFe	CaFe ₃ O ₅	5.5	-	-	-
-	-	-	оксид MgAlCr	MgAlCrO ₄	1.4
-	-	-	анортит	Ca(Al ₂ Si ₂ O ₈)	1.1
магнезиохромит	(Mg _{0.984} Cr _{0.016}) (Cr _{1.984} Mg _{0.016}) O ₄	4.4	-	-	-
кальцит	Ca(CO ₃)	3.6	-	-	-
КПШ (шпинель)	KAlSi ₃ O ₈	1.7	-	-	-
железо	Fe	0.7	железо	Fe	0.4

Анализ показал существенные различия в фазовом составе исследуемых техногенных материалов, что определяет потенциальные направления для их синтеза и использования. В составе шлака РФХ доминируют силикатные и кремнеземсодержащие фазы. Основными кристаллическими фазами являются кварц (SiO_2), его содержание составляет 28.0 %, а также силикат кальция (CaSiO_3) в количестве 23.8 %. Магнийсиликатная фаза представлена форстеритом (Mg_2SiO_4), содержание которого составляет 19.3 %.

Шлак ВУФХ отличается значительно более высоким содержанием магний- и алюмосодержащих фаз. Основными компонентами здесь являются оксид магния, алюминия, железа ($\text{MgAl}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_4$) с массовой долей 48.0 % и форстерит (Mg_2SiO_4) в количестве 42.5 %.

Сравнительный анализ таблицы показал, что содержание ключевых фаз, определяющих прочностные характеристики пропантов, существенно выше в шлаке ВУФХ. Так, содержание фазы $\text{MgAl}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_4$ и форстерита (Mg_2SiO_4) в шлаке РФХ соответственно в 6.8 и 2.2 раза меньше, чем в шлаке ВУФХ. Следует отметить, что в шлаке РФХ обнаружены фазы, такие как оксид кальция железа CaFe_3O_5 , кальцит $\text{Ca}(\text{CO}_3)$, шпинель KAlSi_3O_8 , которые отсутствуют в шлаке ВУФХ. В то же время в шлаке ВУФХ присутствует анортит $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$, который не обнаружен в шлаке РФХ.

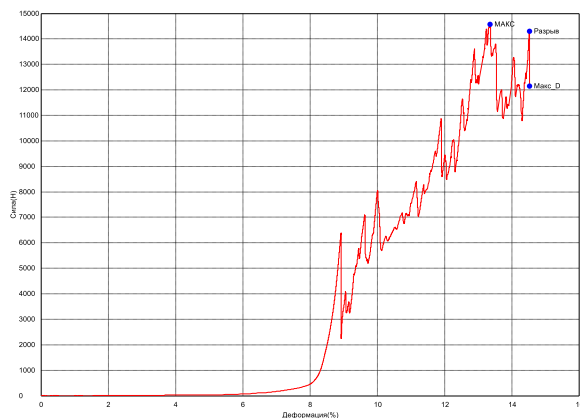
Прочность на сжатие — наиболее критичный параметр для пропантов, поскольку он определяет их способность выдерживать литостатическое давление в пласте. Исходя из этого, шлаки ВУФХ и РФХ были испытаны на прочность.

На рисунках 3 и 4 представлены графики зависимости деформации шлаков РФХ и ВУФХ от силы испытания. Следует отметить, что в рисунках каждый пик это трещина, образующаяся при сжатии на каком-то участке пробы. Шлаки ВУФХ и РФХ не имеют плоскостей и поэтому они разрушались постепенно, соответственно максимальная сила разрушения наблюдалась у того кусочка у которого появились максимально плоские грани.

Анализ графиков зависимости деформации шлаков ВУФХ и РФХ показал, что шлак ВУФХ более прочный, выдерживает более высокую нагрузку при сжатии и разрушается с максимальным значением силы 20939.1 Н (32,46 МПа или 4707 psi) без промежуточных трещин. В отличие от шлака ВУФХ шлак РФХ разрушается постепенно, о чем свидетельствуют промежуточные трещины различные по силе сжатия с максимальным значением силы 14573.1 Н (22,59 МПа или 3277 psi).

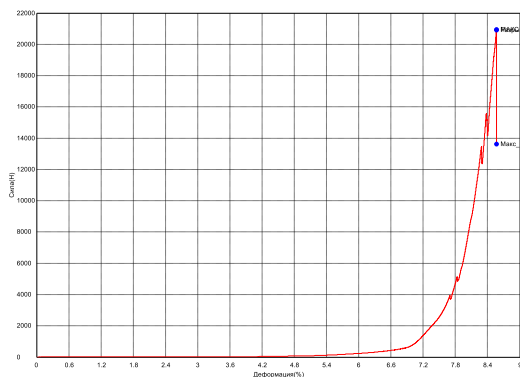
Сравнительный анализ значений такого параметра, как объемная плотность показал их несущественную разницу (таблица 3). Кажущаяся

минералогическая плотность шлака РФХ на $0,3 \text{ г/см}^3$ выше значения для шлака ВУФХ. Существенная разница наблюдается в значениях открытой пористости. Шлак РФХ является более пористым материалом. Значение открытой пористости шлака РФХ на 7.17% выше по сравнению K_p шлака ВУФХ. Исходя из данных таблицы 3 следует, что шлак ВУФХ является более прочным, чем шлак РФХ. Полученные результаты согласуются с испытаниями на сжатие.



Максимальное значение силы испытания: 14573.1 Н
Промежуточные пики значений силы испытания: 6363.408 Н, 7053.741 Н, 7991.043 Н, 8407.338 Н, 10872.750 Н, 11618.650 Н, 13600.520 Н.

Рисунок 3 - График зависимости деформации шлака РФХ от силы испытания



Максимальное значение силы испытания: 20939.1 Н

Рисунок 4 - График зависимости деформации шлака ВУФХ от силы испытания.

Таблица 3 - Объемная плотность, кажущаяся минералогическая плотность, открытая пористость шлаков.

Условия испытания шлаков: температура - 25°C; жидкость насыщения - Вода; давление в вакуумной камере -2 кПа; время вакуумирования - 30 минут; время выдержки в жидкости - 30 минут

Наименование образца	Объемная плотность δ_n , г/см ³	Кажущуюся минералогическая плотность δ_n , г/см ³	Открытая пористость K_n , %
Шлак РФХ	3.94	4.51	12.66
Шлак ВУФХ	3.97	4.20	5.49

Выявленные различия в химическом и минералогическом составе шлаков РФХ и ВУФХ, а также их прочностные характеристики, легли в основу разработки двух типов пропантов, что позволило максимально использовать потенциал каждого отхода:

Шлак РФХ, характеризующийся повышенным содержанием кварца (SiO_2) и силиката кальция (CaSiO_3), был использован для получения пропантов с преобладанием алюмосиликатной фазы. В процессе высокотемпературного обжига ($T_{\text{обж}}$) компоненты шихты взаимодействуют, формируя керамическую матрицу, близкую по составу к муллиту или другим высокопрочным алюмосиликатам.

Шлак ВУФХ, обогащенный форстеритом (Mg_2SiO_4) и магнийалюмоферритом ($\text{MgAl}_{1.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_4$), использовался для создания магнийсиликатных пропантов. Благодаря высокому суммарному содержанию магнийсодержащих фаз (до 90.5%), эти пропанты обладают потенциалом для достижения особо высоких эксплуатационных характеристик, включая превосходную прочность на сжатие.

Таким образом, использование двух видов отходов ферросплавного производства позволило целенаправленно регулировать фазовый состав конечного продукта, что является ключевым фактором для получения пропантов с заданными свойствами.

Типовая технологическая схема производства пропантов включает подготовку шихты, грануляцию со связующим и окончательный высокотемпературный обжиг, после чего наносится полимерное покрытие.

Гранулирование проводили с использованием товарного раствора жидкого стекла (NaSiO_2) в качестве связующего. Добавление связующего позволяет получить гранулы высокой сферичности и однородности, а также обеспечить достаточную прочность сырых гранул, необходимую для транспортировки и загрузки в печь.

Термообработка образцов осуществлялась при температуре 1100°C. Следует отметить, что выбор температуры определялся содержанием форстерита в шлаке. Согласно [16], при содержании форстерита в образцах более 80% требуется более высокая температура обжига (1300-1400°C), тогда как при содержании менее 55% температурный интервал спекания резко снижается. Охлажденные гранулы покрывались полимером в два слоя. Для покрытия использовали водный раствор поливинилового спирта (ПВС).

Для испытаний были выбраны следующие образцы:

Образец 1: ВУФХ-2, соотношение жидкое стекло : вода (1:0) + покрытие ПВС.

Образец 2: ВУФХ-2, соотношение жидкое стекло : вода (1:1) + покрытие ПВС.

Образец 3: РФХ-2, соотношение жидкое стекло : вода (1:0) + покрытие ПВС.

Далее была проведена оценка эксплуатационных характеристик синтезированных пропантов на соответствие требованиям ГОСТ 54571-2011 (НД), что является ключевым этапом, подтверждающим возможность их промышленного применения в ГРП.

В статье определены основные технические характеристики: гранулометрический состав, насыпная плотность, сферичность и округлость, растворимость в соляной кислоте и сопротивление раздавливанию. Насыпная проницаемость и пропускная способность пропантов в трещине ГРП напрямую зависит от геометрии частиц.

Таблица 4 - Насыпная плотность полученных пропантов

Наименование определяемых характеристик, единицы измерений	Норма по НД	Образец	Фракция, мм					
			+5	-5+3	-3+2	-2+1 (10/18)	-1+0,5	-0,5
Доля фракций, %	Не менее 90% основной фракции	1	3.4	37.5	29.6	28.1	1.2	0.2
		3	0	9.8	37.9	42.9	9.4	0
		4	0	13.1	29.9	46.3	10.7	0
Насыпная плотность, г/см ³	Не более 1.75	1	1.13	1.03	1.09	1.12	1.2	
		3	0	0.95	1.16	1.25	1.1	0
		4	0	0.81	0.74	0.76	0.88	0

Данные по насыпной плотности выбранных образцов приведены в Таблице 4.

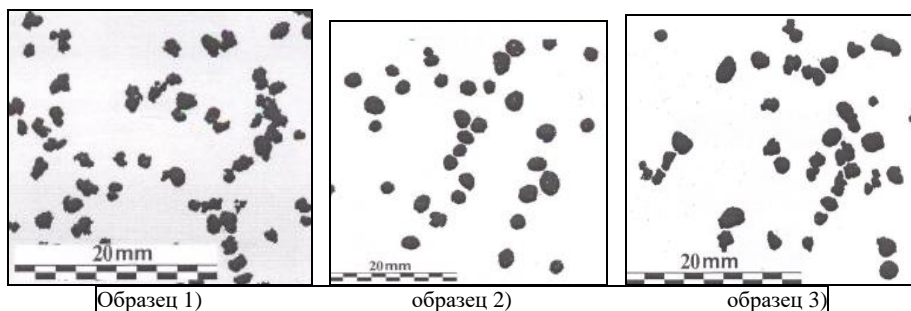
Результаты испытаний показали, что насыпная плотность всех представленных образцов не превышает 1.75 г/см^3 , что полностью соответствует нормативу ГОСТ 54571-2011.

Гранулометрический состав пропантов напрямую зависит от способа грануляции; максимальная доля основной фракции в отобранных образцах пришлась на фракцию 10/18. Данный показатель может быть легко скорректирован путем использования специализированного технологического оборудования или проведением дополнительного рассева по завершении стадии грануляции.

В последние годы нефтедобыча осуществляется в сложных геологических условиях, что требует закачки пропантов сферической или близкой к сферической формы. Такие параметры критически важны, поскольку они обеспечивают экономичную транспортировку пропантов и стабилизируют трещину скважины, повышая нефтеотдачу.

Сферичность образцов пропантов определялась визуальной оценкой с использованием диаграммы Кrumбьена-Шлосса. Соответствующие данные представлены в Таблице 5.

Таблица 5 - Сферичность образцов пропантов из ВУФХ и РФХ с использованием диаграммы Кrumбьена-Шлосса



Наименование определяемых характеристик, единицы измерений	Норма по НД	Фактические значения по результатам испытаний			Нормативный документ (НД) на методы испытаний
		Образец 1	Образец 2	Образец 3	
Округлость, условные единицы	Не менее 0.7	0.42	0.79	0.54	ГОСТ 54571-2011, п.8.4
Сферичность, условные единицы	Не менее 0.7	0.53	0.85	0.73	

Показатель сферичности и округлости готовых пропантов не должен быть меньше 0.7. Образец, полученный из шлака ВУФХ, где в качестве связующего использовался водный раствор жидкого стекла в соотношении с водой 1:1 (Образец 2), проходит по норме. Все остальные образцы не соответствуют требованиям ГОСТ 54571-2011, п.8.4.

Выбранные образцы пропантов подверглись тесту на растворимость в соляной кислоте. Несмотря на двухслойное полимерное покрытие, растворимость опытных образцов в соляной кислоте превышает норму в 1% (результаты представлены в Таблице 6). Такие показатели не соответствуют требованиям ГОСТ 54571-2011, п.8.6.

Таблица 6 - Определение растворимости в соляной кислоте

Наименование определяемых характеристик, единицы измерений	Норма по НД	Фактические значения по результатам испытаний	Нормативный документ (НД) на методы испытаний
Растворимость в соляной кислоте, % образец 1	Не более 1	11.6	ГОСТ 54571-2011, п.8.6
Растворимость в соляной кислоте, % образец 2	Не более 1	10.3	
Растворимость в соляной кислоте, % образец 3	Не более 1	5.9	

Таблица 7 - Сопротивление раздавливанию образцов пропантов

Наименование определяемых характеристик, единицы измерений	Массовая доля разрушенных гранул f, %				Нормативный документ (НД) на методы испытаний
	Норма по НД	Фактические значения по результатам испытаний			
		Образец 1	Образец 2	Образец 3	
Сопротивление раздавливанию, при давлении 34.5 МПа	Не более 15	29.3	62.4	72.9	ГОСТ 54571-2011, п.8.11
Сопротивление раздавливанию, при давлении 51.7 МПа (7500 psi)	Не более 20	37	—	74.1	
Сопротивление раздавливанию, при давлении 68.9 МПа (10000 psi)	Не более 20	46.1	—	79.7	

Образцы пропантов, полученные из шлаков ВУФХ и РФХ, были протестированы на механическую прочность путем определения массовой доли гранул, разрушенных заданной сжимающей нагрузкой. Испытания проводились при давлении 34.5 МПа, 51.7 МПа и 68.9 МПа (результаты представлены в Таблице 7).

Все образцы не удовлетворяют требованиям п.8.11 ГОСТ 54571-2011.

Образцы пропантов, полученные из шлака ВУФХ (магнийсиликатные), при оптимальной температуре обжига продемонстрировали высокую механическую прочность по сравнению с образцами из шлака РФХ.

Процент разрушенных гранул магнийсиликатных пропантов на основе шлаков ВУФХ при всех нагрузках превышает допустимую норму примерно только на 20%. Эти результаты свидетельствуют о достаточной прочности для применения в пластах со средним давлением.

4. Заключение

В перспективе, при подборе подходящего связующего и применении эффективной технологии грануляции шихты, эти пропанты могут стать экономически эффективной альтернативой для использования в глубоких скважинах с высокими пластовыми давлениями.

Таким образом, доказана экономическая целесообразность и технологическая возможность получения высокоэффективных пропантов на основе отходов ферросплавного производства, что соответствует стратегическим задачам по утилизации техногенных отходов и снижению импортозависимости.

ФЕРРОКОРЫТПА ӨНДІРІСІНІҢ ҚАЛДЫҚТАРЫ НЕГІЗІНДЕ ПРОПАНТТАРДЫ АЛУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ПАЙДАЛАНУ СИПАТТАМАЛАРЫН БАҒАЛАУ

*К.А. Кадирбеков^{*1}, М.Т. Ошакбаев¹, Н.А. Бузаев¹, Н.Н. Оралбаев¹,
Г.Г. Сейтхал¹, С. Кенезес¹, Н.А. Шадин², А.Ж. Абюров^{3,4}, Р. Қайынбаева¹,
А.А. Еспенбетов¹, М.Н. Баимбетов¹*

¹«Ә.Б. Бектұров атындағы Химия ғылымдары институты» АҚ, Алматы, Қазақстан

²«Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті» КеАҚ, Алматы, Қазақстан

³«ERG ғылыми-инженерлік зерттеу орталығы» ЖШС, Астана, Қазақстан

⁴«Қазақ-Британ Техникалық Университеті» АҚ (КБТУ), Алматы, Қазақстан

Түйіндемe. Феррокорытпа өндірісінің техногендік қалдықтарынан (РФХ және ВУФХ шлактары) сұйық шыны және полимерлі жабын (ПВС) қолдану арқылы пропанттарды алу мүмкіндігі зерттелді. Беріктік фазаларына бай (90.5%) ВУФХ шлағы ең перспективалы шикізат болып табылатыны анықталды. ВУФХ негізінде алынған пропанттар сфералықтың нормативтік көрсеткіштеріне жетті, бірақ ГОСТ 54571-2011 талаптарына жаншылуға төзімділігі (нормативті 20% асыру) және НСІ-де ерігіштігі бойынша сәйкес келмейді. ГОСТ-қа толық сәйкестікке қол жеткізу үшін шихта құрамын және күйдіру режимін одан әрі оптайландыру қажеттілігімен орташа

қысымды қабаттарда қолдануға жарамды магнийсиликатты пропанттарды өндірудің технологиялық мүмкіндігі негізделді. Бұл қалдықтарды пайдалану экономикалық тұрғыдан тиімді деп танылды.

Түйін сөздер: Пропанттар, Ферроқорытпа шлактары, Пластты гидравликалық бұзу, Магний силикаттар, Пайдалану сипаттамалары, Техногендік шикізат.

Кадирбеков Кайрат Адырбекұлы	<i>Химия ғылымдарының докторы</i>
Ошакбаев Мэлс Тлеубердіұлы	<i>Техника ғылымдарының докторы</i>
Бузаев Нұрдаулет Аманжолұлы	<i>PhD докторанты</i>
Оралбаев Нұрсұлтан	<i>Магистрант</i>
Сейтхал Гүлнәр	<i>Бакалавр</i>
Кенегес Сұлушаи	<i>Бакалавр</i>
Шадин Нұрғұл	<i>PhD</i>
Абюров Арман Жумағұлұлы	<i>PhD докторанты</i>
Кайынбаева Раушан	<i>Химия ғылымдарының кандидаты</i>
Еспенбетов Асылбек Алібекұлы	<i>Химия ғылымдарының докторы</i>
Баимбетов Мизамбек	<i>Техника ғылымдарының кандидаты</i>

Список литературы:

1. Нефтегазовый сектор в структуре национальной экономики РК. Электронное правительство РК. Режим доступа: <http://e.gov.kz> (дата обращения: 19.11.2025).
2. Кутепова М. «За десять лет с российского рынка пропантов импорт был полностью вытеснен». Коммерсантъ. 20.03.2020. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru> (дата обращения: 19.11.2025).
3. Электронный ресурс: russian.alibaba.com (дата обращения 31.01.2022).
4. Рынок пропантов в России в 2018. Анализ и обзор рынка. Режим доступа: <https://www.indexbox.ru>.
5. Axel Reports. Global Proppants for Hydraulic Fracturing Market Analysis and Forecast. Режим доступа: <https://axelreports.com>.
6. Гидравлический разрыв пласта (ГРП). Режим доступа: <http://oilloom.ru> (от 05.03.2018 г.).
7. Пат. 2463329 Российская Федерация, МПК C04B35/00. Способ изготовления высокопрочного магнийсиликатного пропанта. Плотников В.А., Плинер А.С., Плейчев В.Г., Плинер С.Ю. № 2012117170/03; заявл. 25.04.2012; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19.
8. Пат. US 0241157 США, МПК E21B43/267. Пропант и способ получения пропанта. Можжерин В.А. [и др.]. № 14/233890; заявл. 08.08.2012; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.
9. Пат. 2389710 Российская Федерация, МПК C04B35/00. Способ получения алюмосиликатного пропанта и состав для его получения. Вакалова Т.В., Погребенков В.М., Решетова А.А. № 2009112521/03; заявл. 06.04.2009; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14.
10. Пат. 2737683С1 Российская Федерация, МПК C04B35/00. Магнийсиликатный пропант и способ его получения. Фарбер И.А. № 2020113872; заявл. 30.04.2020; опубл. 02.12.2020, Бюл. № 34.

11. Пат. 012634B1 Евразийская патентная организация, МПК E21B43/267. Композиция и способ получения проппанта. Смит Р. Дж. [и др.]. № 200801869; заявл. 18.11.2008; опубл. 30.12.2009.
12. Бирюкова А. А., Вакалова Т. В., Джиеналыев Т. Д., Тихонова Т. А. Керамические проппанты из сырья Казахстана для нефтедобывающей промышленности. *Известия НАН РК. Серия химическая*. **2017**. № 4. С. 184–191.
13. Адилов Г. А., Поволоцкий А. Д., Зырянов С. В., Рощин В. Е. Получение расклинивающего материала (проппанта) для нефтедобывающей промышленности из металлургических шлаков. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. **2018**. Т. 18, № 1. С. 58–63. DOI: 10.14529/met180108.
14. Awan F. U. R., Keshavarz A. Adsorption of nanoparticles on glass bead surface for enhancing proppant performance: A systematic experimental study. *Journal of Molecular Liquids*. **2021**. Vol. 328. Art. 115398. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.115398.
15. Ali Aref Ali Alzanam, Umair Ishtiaq, Ali Samer Muhsan, and Norani Muti Mohamed. A Multiwalled Carbon Nanotube-Based Polyurethane Nanocomposite-Coated Sand. Proppant for Improved Mechanical Strength and Flowback Control in Hydraulic Fracturing Applications. *ACS Omega* **2021** 6 (32), 20768-20778. DOI: 10.1021/acsomega.1c01639
16. Патент 2235703 РФ Способ приготовления керамических расклинивателей нефтяных скважин. С.Ю. Плинер, С.Ф. Шмтёв, заявка №2002114787; заяв. 12.05.2003; опубл. 10.10.2004, Бюл. № 15 – 9с.

References

1. Oil and Gas Sector in the Structure of the National Economy of the Republic of Kazakhstan. Electronic Government of the RK. Available at: <http://e.gov.kz> (accessed 19.11.2025).
2. Kutepova M. "Import Was Completely Displaced from the Russian Proppant Market in Ten Years". *Kommersant*. 20.03.2020. Available at: <https://www.kommersant.ru> (accessed 19.11.2025).
3. Electronic resource: russian.alibaba.com (accessed 31.01.2022).
4. Proppant Market in Russia in 2018. Market Analysis and Review. Available at: <https://www.indexbox.ru>.
5. Axel Reports. Global Proppants for Hydraulic Fracturing Market Analysis and Forecast. Available at: <https://axelreports.com>.
6. Hydraulic Fracturing (HF). – Available at: <http://oilloot.ru> (dated 05.03.2018).
7. Pat. 2463329 Russian Federation, IPC C04B35/00. Method for manufacturing high-strength magnesium silicate proppant. Plotnikov V.A., Pliner A.S., Pleychev V.G., Pliner S.Yu. No. 2012117170/03; filed 25.04.2012; publ. 10.07.2014, Bull. No. 19.
8. Pat. US 0241157 USA, IPC E21B43/267. Proppant and method for producing proppant. Mozherin V.A. [et al.]. No. 14/233890; filed 08.08.2012; publ. 10.06.2014, Bull. No. 16.
9. Pat. 2389710 Russian Federation, IPC C04B35/00. Method for producing aluminosilicate proppant and composition for its production. Vakalova T.V., Pogrebenkov V.M., Reshetova A.A. No. 2009112521/03; filed 06.04.2009; publ. 20.05.2010, Bull. No. 14.
10. Pat. 2737683C1 Russian Federation, IPC C04B35/00. Magnesium silicate proppant and method for its production. Farber I.A. No. 2020113872; filed 30.04.2020; publ. 02.12.2020, Bull. No. 34.
11. Pat. 012634B1 Eurasian Patent Organization, IPC E21B43/267. Composition and method for producing proppant. Smith R.J. [et al.]. No. 200801869; filed 18.11.2008; publ. 30.12.2009.
12. Biryukova A.A., Vakalova T.V., Dzhienaliev T.D., Tikhonova T.A. Ceramic proppants from Kazakh raw materials for the oil industry. *Izvestiya NAN RK. Seriya Khimicheskaya* (Bulletin of the NAS RK. Chemical Series). **2017**. No. 4. pp. 184–191.
13. Adilov G.A., Povolotskiy A.D., Zyryanov S.V., Roshchin V.E. Production of fracturing material (proppant) for the oil industry from metallurgical slags. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Metallurgiya"* (Bulletin of SUSU. Series "Metallurgy"). **2018**. Vol. 18, No. 1. pp. 58–63. DOI: 10.14529/met180108.

14. Awan F.U.R., Keshavarz A. Adsorption of nanoparticles on glass bead surface for enhancing proppant performance: A systematic experimental study. *Journal of Molecular Liquids*. **2021**. Vol. 328. Art. 115398. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.115398.

15. Ali Aref Ali Alzanam, Umair Ishtiaq, Ali Samer Muhsan, and Norani Muti Mohamed. A Multiwalled Carbon Nanotube-Based Polyurethane Nanocomposite-Coated Sand/Proppant for Improved Mechanical Strength and Flowback Control in Hydraulic Fracturing Applications. *ACS Omega* **2021** 6 (32), 20768-20778. DOI: 10.1021/acsomega.1c01639.

16. Pat. 2235703 Russian Federation. Method for preparing ceramic proppants for oil wells. Pliner S.Yu., Shmtyev S.F. Application No. 2002114787; filed 12.05.2003; publ. 10.10.2004, Bull. No. 15. 9 p.