

УДК 631.811.943; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2024-5.15>

<https://orcid.org/0000-0001-5334-2379>

<https://orcid.org/0000-0002-4739-3636>

<https://orcid.org/0009-0008-8148-9317>

<https://orcid.org/0000-0002-0842-3804>

<https://orcid.org/0000-0003-3028-481X>

<https://orcid.org/0000-0001-7336-126X>

## МЕТОДЫ ТЕРМОГАЗОХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ НЕФТЕДОБЫЧИ



**А.Б. АРТЫҚБАЕВА<sup>1,2</sup>**,  
докторант, МНС,  
Института проблем горения,  
[aidartykbayeva@gmail.com](mailto:aidartykbayeva@gmail.com)



**Б.С. САДЫКОВ<sup>2</sup>**,  
PhD, ВНС Института  
проблем горения,  
[sadykoff.baha89@gmail.com](mailto:sadykoff.baha89@gmail.com)



**А.С. ХАЙРУЛЛИНА<sup>2</sup>**,  
МНС Института проблем  
горения,  
[H\\_ainura\\_98@mail.ru](mailto:H_ainura_98@mail.ru)



**А.О. ЖАПЕКОВА<sup>1,3</sup>**,  
PhD, ИС Института проблем  
горения, ст. преподаватель,  
[anarazhapekova83@gmail.com](mailto:anarazhapekova83@gmail.com)



**М.К. АТАМАНОВ<sup>1,3</sup>**,  
PhD, ВНС Института  
проблем горения,  
ст. преподаватель,  
[mk.atamanov@gmail.com](mailto:mk.atamanov@gmail.com)



**А.Е. БАҚҚАРА<sup>1,2</sup>**,  
PhD, ст. преподаватель  
[bakkara.ayagoz@kaznu.kz](mailto:bakkara.ayagoz@kaznu.kz)

<sup>1</sup>ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ГОРЕНИЯ,  
Республика Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172

<sup>2</sup>КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АЛЬ-ФАРАБИ,  
Республика Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71

<sup>3</sup>КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЖЕНСКИЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ,  
Республика Казахстан, 050000, г. Алматы, ул. Гоголя, 161

*Представлены результаты исследования влияния модификаторов, таких как стеариновая кислота, графит и поливиниловый спирт на характеристики горения алюминиевого порошка для газогенераторных составов для нефтегазовых скважин. Применяемая методология включает механохимическую обработку алюминия с различными модификаторами и последующий анализ их влияния на скорость и температуру горения газогенераторов. Результаты демонстрируют, что добавление со стеариновой кислотой показали увеличение скорости горения на 25%. Данные изменения подтверждены результатами инфракрасной спектроскопии и термогравиметрического анализа, что подчеркивает значительное улучшение характеристик горения.*

*Результаты исследования показывают, что модификация алюминиевого порошка позволяет создавать более эффективные и безопасные топливные и взрывчатые смеси для газогенераторов с высокой удельной энергоемкостью, снижая риски, связанные с высокой температурой воспламенения и неполным сгоранием.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** модификатор, алюминий, стеариновая кислота, поливиниловый спирт, графит, механохимическая обработка, газогенераторные составы.

## МҰНАЙ ӨНДІРУДІ ҚАРҚЫНДАТУ ҮШІН ТЕРМОГАЗОХИМИЯЛЫҚ ӘСЕР ЕТУ ӘДІСТЕРІ

**А.Б. АРТЫҚБАЕВА**<sup>1,2</sup>, докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, химиялық физика және материалтану кафедрасы, КҒҚ жану проблемалары институты, [aidartykbayeva@gmail.com](mailto:aidartykbayeva@gmail.com)

**Б.С. САДЫКОВ**<sup>1</sup>, PhD, ЖҒҚ жану проблемалары институты, [sadykoff.baha89@gmail.com](mailto:sadykoff.baha89@gmail.com)

**А.С. ХАЙРУЛЛИНА**<sup>1</sup>, КҒҚ жану проблемалары институты, [H\\_ainura\\_98@mail.ru](mailto:H_ainura_98@mail.ru)

**А.О. ЖАПЕКОВА**<sup>1,3</sup>, PhD, ҒҚ жану проблемалары институты, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университетінің аға оқытушысы, [anarazhapekova83@gmail.com](mailto:anarazhapekova83@gmail.com)

**М.К. АТАМАНОВ**<sup>2,3</sup>, PhD, ЖҒҚ жану проблемалары институты, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университетінің аға оқытушысы, [mk.atamanov@gmail.com](mailto:mk.atamanov@gmail.com)

**А.Е. БАККАРА**<sup>1,2</sup>, PhD, ЖҒҚ жану проблемалары институты, аға оқытушы әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, химиялық физика және материалтану кафедрасы, [bakkara.ayagoz@kaznu.kz](mailto:bakkara.ayagoz@kaznu.kz)

<sup>1</sup>ЖАНУ ПРОБЛЕМАЛАРЫ ИНСТИТУТЫ,  
Қазақстан Республикасы, 050012, Алматы қаласы, Бөгенбай батыр көшесі, 172

<sup>2</sup>ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ,  
Қазақстан Республикасы, 050040, Алматы қаласы, әл-Фараби даңғылы, 71

<sup>3</sup>ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ҚЫЗДАР ПЕДАГОГИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТ,  
Қазақстан Республикасы, 050000, Алматы қаласы, Гоголь көш., 161

*Бұл жұмыста стеарин қышқылы, графит және поливинил спирті сияқты модификаторлардың мұнай және газ ұңғымаларына арналған газгенераторлық құрамдар үшін алюминий ұнтағының жану сипаттамаларына әсерін зерттеу нәтижелері берілген. Қолда-*

нылатын әдістеме алюминийді әртүрлі модификаторлармен механикалық өңдеуді және олардың газ генераторларының жану жылдамдығы мен температурасына әсерін кейіннен талдауды қамтиды. Нәтижелер стеарин қышқылымен толықтыру жану жылдамдығының 25%-ға артқанын көрсетті. Бұл өзгерістер инфрақызыл спектроскопия және термогравиметриялық талдау арқылы расталады, жану сипаттамаларының айтарлықтай жақсарғанын көрсетеді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, алюминий ұнтағының модификациясы жоғары тұтану температурасымен және толық емес жанумен байланысты тәуекелдерді азайта отырып, жоғары меншікті энергиясы бар газ генераторлары үшін тиімдірек және қауіпсіз отын мен жарылғыш қоспаларды жасауға мүмкіндік береді.

**ТҮЙІН СӨЗДЕР:** модификатор, алюминий, стеарин қышқылы, поливинилспирті, графит, механохимиялық өңдеу, газ генераторының құрамы.

## METHODS OF THERMOGASOCHEMICAL IMPACT FOR INTENSIFYING OIL PRODUCTION

**A.B. ARTYKBAYEVA**<sup>1,2</sup>, doctoral student, Al-Farabi Kazakh National University, Department of Chemical Physics and Materials Science, Junior Researcher, Institute of Combustion Problems, [aidartykbayeva@gmail.com](mailto:aidartykbayeva@gmail.com)

**B.S. SADYKOV**<sup>1</sup>, PhD, Leading Researcher, Institute of Combustion Problems, [sadykoff.baha89@gmail.com](mailto:sadykoff.baha89@gmail.com)

**A.S. KHAIRULLINA**<sup>1</sup>, Junior Researcher, Institute of Combustion Problems, [H\\_ainura\\_98@mail.ru](mailto:H_ainura_98@mail.ru)

**A.O. ZHAPEKOVA**<sup>1,3</sup>, PhD, Researcher, Institute of Combustion Problems, Senior lecturer Kazakh National Women's Teacher Training University, [anarazhapekova83@gmail.com](mailto:anarazhapekova83@gmail.com)

**M.K. ATAMANOV**<sup>2,3</sup>, PhD, Leading Researcher, Institute of Combustion Problems, Senior lecturer Kazakh National Women's Teacher Training University, [mk.atamanov@gmail.com](mailto:mk.atamanov@gmail.com)

**A.E. BAKKARA**<sup>1,2</sup>, PhD, Leading Researcher at the Institute of Combustion Problems, senior lecturer. Al-Farabi Kazakh National University, Department of Chemical Physics and Materials Science, [bakkara.ayagoz@kaznu.kz](mailto:bakkara.ayagoz@kaznu.kz)

<sup>1</sup>INSTITUTE OF COMBUSTION PROBLEMS,  
Bogenbay batyr st 172, 050012, Republic Kazakhstan

<sup>2</sup>AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY,  
al-Farabi ave 71, Almaty, 050040, Republic Kazakhstan

<sup>3</sup>KAZAKH NATIONAL WOMEN'S TEACHER TRAINING UNIVERSITY,  
Gogolya st 161, Almaty, 050000, Republic Kazakhstan

*This paper presents the results of a study of the effect of modifiers such as stearic acid, graphite and polyvinyl alcohol on the combustion characteristics of aluminum powder for gas generator compositions for oil and gas wells. The methodology used includes mechanochemical treatment of aluminum with various modifiers and subsequent analysis of their effect on the combustion rate and temperature of gas generators. The results demonstrate that the addition of stearic acid showed an increase in the combustion rate by 25%. These changes are confirmed by the results of infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis, which emphasizes a significant improvement in combustion characteristics. The results of the study show that modification of aluminum powder allows for the creation of more efficient and safe fuel and explosive mixtures for gas generators with high specific energy capacity, reducing the risks associated with high ignition temperatures and incomplete combustion.*

**KEYWORDS:** modifier, aluminum, stearic acid, polyvinyl alcohol, graphite, mechanochemical treatment, gas generator compositions.

**В**ведение. В области нефтегазодобывающей и горнодобывающей промышленности применяются технологии для разрыва и термогазохимической обработки призабойной зоны пласта с помощью газообразных продуктов сгорания твёрдого ракетного топлива, высокоэнергетических пиротехнических и пороховых топлив, а также газодинамической обработки в импульсно-волновом режиме, чтобы повысить эффективность добычи нефти, газа, в том числе из угольных пластов, и металлов методом подземного выщелачивания. Эти методы способствуют увеличению скорости роста давления пороховых газов и улучшению воздействия на пласт благодаря использованию в газогенераторе бронированных и небронированных зарядов различной формы и конфигурации, их оптимальному соотношению и количеству, а также применению мощных высокоскоростных воспламенителей [1].

Особенностью газогенераторов для нефтегазовых скважин на основе алюминия является их взрывобезопасность, т.е. когда процесс распространяется в режиме дефлаграционного горения, и в забое в одной технологической операции создаются одновременно высокие или повышенные давления, высокая температура, а также газообразные продукты, в том числе состоящих преимущественно из активных высокотемпературных химических реагентов [2].

Алюминиевый порошок широко применяется в составе газогенераторов, взрывчатых веществ, ракетного топлива и других энергетических материалов благодаря своей высокой энергоёмкости, значительной теплотворной способности при сгорании, доступности и другим преимуществам, что значительно улучшает их эксплуатационные характеристики [3-9]. Из-за низкой токсичности, высокой доступности и большой плотности энергии алюминий часто используется как металлическое топливо в твердотопливных ракетах, определяя такие ключевые параметры, как скорость горения и удельный импульс.

Проведено множество исследований, направленных на анализ влияния размера частиц алюминиевого порошка на свойства различных составов [10]. Муравьев Н. и коллеги [11] показали, что ультрадисперсный алюминиевый порошок может увеличить скорость горения и полноту сгорания в 2,5 и 4 раза соответственно по сравнению с микронным алюминиевым порошком. Китайские исследователи также изучали влияние размера частиц, их формы и окружающей атмосферы на характеристики материалов [12-14]. Например, Хуан И. и коллеги исследовали влияние размера и формы частиц алюминиевого порошка на давление и температуру в процессе реакции в условиях вакуума. При исследовании частиц алюминиевого порошка четырех различных размеров было установлено, что влияние порошка на давление не всегда соответствует его влиянию на температуру. Фенг Х. и коллеги [15] показали, что при массовой доле алюминированного состава в 35% энергия реакции алюминиевого порошка уменьшается почти на 40% по сравнению с чешуйчатым алюминиевым порошком.

Однако высокая химическая активность алюминиевого порошка приводит к неизбежному образованию наружного слоя оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) во время его производства, транспортировки и использования. Температура плавления наружного слоя  $Al_2O_3$  ( $2072^\circ C$ ) значительно выше, чем у  $Al$  ( $660^\circ C$ ), что повышает температуру воспламенения [16]. Кроме того, ядро алюминия неизбежно расширяется

и разрушается во время горения, вызывая агломерацию и снижая эффективность сгорания. Несмотря на низкую стоимость, хорошую безопасность и высокую энтальпию горения, чистый алюминиевый порошок имеет ряд недостатков, таких как длительное время задержки воспламенения, высокая температура воспламенения, неполное сгорание и низкая эффективность горения [17]. В отличие от чистого алюминия, порошки на основе алюминия с модификаторами показывают более низкую температуру воспламенения, сокращенное время задержки воспламенения, улучшенную окислительную активность и полноту сгорания, а также повышенную эффективность выделения энергии [18].

Взаимосвязь между размером частиц алюминиевого порошка и характеристиками различных модификаторов остается неясной [19], а исследований, посвященных влиянию содержания алюминия на энергетическую эффективность, недостаточно. В связи с этим, актуальной задачей является исследование влияния различных модификаторов на термокинетические характеристики алюминиевых порошков. Цель данной работы – исследовать влияние механохимической обработки на термокинетические свойства алюминиевых порошков с различными модификаторами и проанализировать изменения в их структуре и реакционной способности.

**Материалы и методы исследования.** Механохимическая обработка (МХО) алюминия проводилась с графитом (С), стеариновой кислотой ( $C_{17}H_{35}COOH$ ) и поливиниловым спиртом ( $(C_2H_3OH)_n$ ) при разном количестве модифицирующей добавки (от 5 до 20 %). Чтобы предотвратить окисление частиц алюминия кислородом воздуха после МХО и оценить изменения, действительно связанные с механическим воздействием, образцы диспергированной смеси пассивировались гексаном ( $C_6H_{14}$ ). Полученные модифицированные порошки алюминия исследовали с помощью физико-химических методов анализа. ИК-спектры образцов были получены с использованием ИК-спектрометра UR-20 компании «Mattson» (США), оснащенного Фурье-преобразователем. Исследования проводились в средней области инфракрасного спектра в диапазоне от 400 до 4000  $cm^{-1}$ .

Определение насыпной плотности проводилось согласно ГОСТ 2211-94 и ИУС 992. Насыпная плотность порошкового материала вычисляется по формуле:

$$\rho_{\text{нас}} = m / V, \quad (1)$$

где,  $m$  – навеска порошка, г;  $V$  – объем сосуда кубической формы,  $cm^3$ .

Термический анализ образцов, выполненный методом термогравиметрии (ТГ), был проведён на приборе NETZSCH 449F3A-0372-M в атмосфере азота с чистотой 99,99%. Измерения проводились в диапазоне температур от 30 до 1000 °С при скорости нагрева 10 К/мин.

**Результаты и обсуждение.** Введение модификаторов, таких как графит, стеариновая кислота и поливиниловый спирт в состав порошков алюминия позволяет существенно улучшить их физико-химические свойства, что имеет важное значение для разработки высокоэффективных горючих систем. Графит, благодаря своим смазочным свойствам, снижает коэффициент трения и способствует более равномерной

му распределению тепла в процессе горения, что может повысить эффективность реакций. Стеариновая кислота, выступая в роли смачивателя, улучшает дисперсию алюминиевых частиц, способствуя образованию более однородных смесей. Это, в свою очередь, улучшает процесс горения и повышает стабильность составов. Поливиниловый спирт, являясь полимером с хорошими связующими свойствами, усиливает взаимодействие между частицами, что приводит к формированию более стабильных и однородных материалов.

Таким образом, применение этих модификаторов в сочетании с механохимической обработкой порошков алюминия открывает новые перспективы для создания горючих составов с улучшенными характеристиками, что делает данное направление исследований особенно актуальным.

Наибольшие значения насыпной плотности были достигнуты при 20-минутной обработке алюминия с 5% поливиниловым спиртом (рисунок 1). Эти результаты можно объяснить как изменением полидисперсности порошка, что влияет на плотность упаковки частиц при заполнении мерного сосуда, так и образованием модифицированного слоя на поверхности частиц в процессе размола. Низкие значения насыпной плотности у порошка, модифицированного стеариновой кислотой, обусловлены как высокой дисперсностью данного порошка, так и значительным вкладом модифицированной заполимеризованной части.

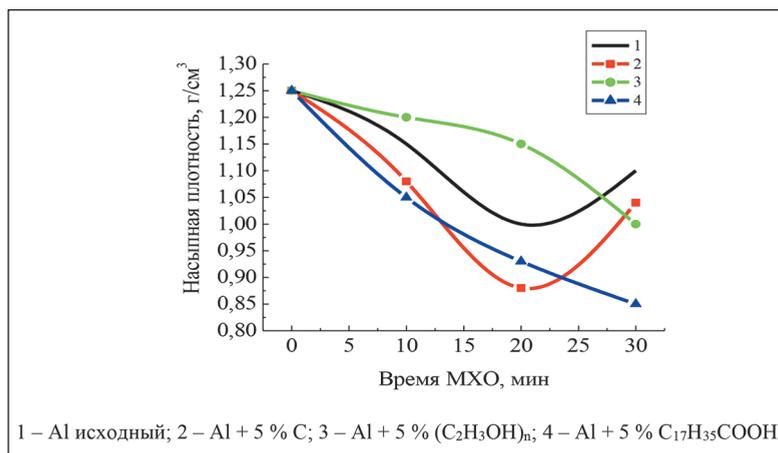


Рисунок 1 – Зависимость изменения насыпной плотности

На рисунке 2 представлены ИК-спектры композита Al + 5% C. Механохимическая обработка порошков алюминия и графита приводит к появлению полос колебаний различных групп C-H, что, вероятно, связано с добавлением гексана (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>) в процессе МХО для пассивации.

Рисунок 2 демонстрирует наличие полос в ИК-спектре, соответствующих валентным и деформационным колебаниям гидроксильной группы –ОН в диапазонах 3400 и 1600 см<sup>-1</sup>. Кроме того, присутствуют полосы поглощения при 2960 см<sup>-1</sup>, которые связаны с колебаниями групп –CH<sub>2</sub> и –CH<sub>3</sub>. В интервале частот 1400-1390 см<sup>-1</sup> наблюдаются сигналы средней интенсивности, обусловленные деформационными колебаниями групп –CH, а также слабый сигнал этой группы при 800 см<sup>-1</sup>. При

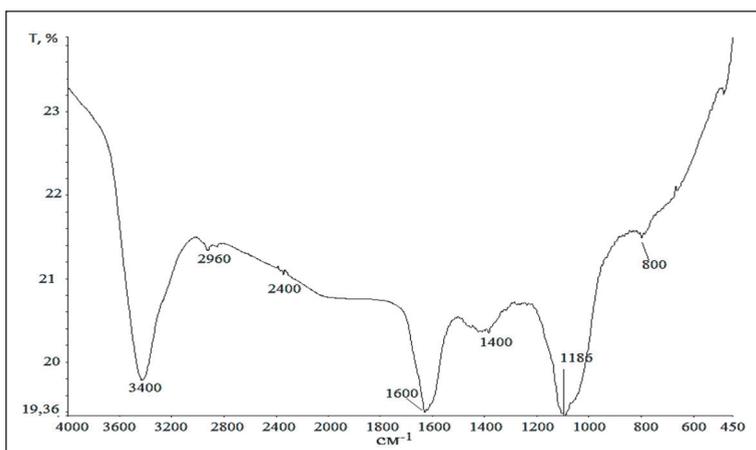


Рисунок 2 – ИК спектры композиции Al + 5 % С после МХО

частоте  $1186 \text{ см}^{-1}$  зафиксирован сигнал средней интенсивности, соответствующий деформационным колебаниям  $\delta_{as}Al-OH$ .

Таким образом, в результате МХО алюминия с графитом в присутствии гексана на поверхности измельченных и деформированных частиц алюминия формируются группы  $-CH$  различной валентности, помимо уже присутствующих в исходном порошке гидроксильных групп.

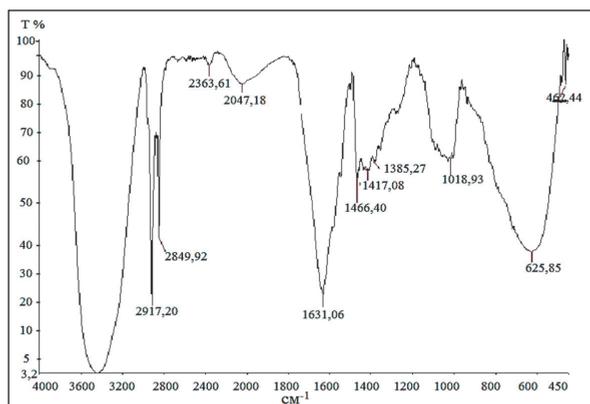


Рисунок 3 – ИК спектры композиции Al + 5%  $(C_2H_3OH)_n$  после МХО

В результате МХО алюминия с 5%  $(C_2H_3OH)_n$  на поверхности алюминиевых порошков фиксируются полосы поглощения, характерные для колебаний групп  $-CH_3$  и  $-CH_2$  ( $2917,20 \text{ см}^{-1}$  и  $2849,92 \text{ см}^{-1}$ ). Также наблюдаются отчетливые полосы, соответствующие  $\nu(OH)$  молекулы воды ( $1681 \text{ см}^{-1}$ ), карбоксилат-иону ( $1466,40 \text{ см}^{-1}$ ), и диапазону волновых чисел для первичных, вторичных и третичных спиртов ( $1385$  и  $1417 \text{ см}^{-1}$ ). Полимерные ассоциаты спиртов, образующиеся на поверхности благодаря водородным связям, разрушаются при диспергировании и восстанавливаются после снятия нагрузки. В результате механохимической обработки алюминия с поливиниловым спиртом наблюдается значительное усиление интенсивности ос-

новных полос, особенно гидроксильной группы  $-\text{OH}$  ( $3400 \text{ см}^{-1}$ ), по сравнению с композицией (Al + 3% C). Кроме того, появляется интенсивная полоса поглощения при  $1018,93 \text{ см}^{-1}$ , соответствующая группе Al-O. Эти изменения в спектрах обусловлены деструкцией поливинилового спирта под воздействием механических сил и прививкой радикальных образований к поверхности частиц.

Аналогичные структурные изменения поверхности можно наблюдать при обработке алюминия со стеариновой кислотой в концентрации 5% (рисунок 4). В ходе МХО на вновь обнажаемых поверхностях формируются основные центры, и появляются четкие полосы, соответствующие колебаниям  $\nu(\text{OH})$  и  $\delta(\text{OH})$  связанных гидроксильных групп при частотах  $3400$  и  $1632 \text{ см}^{-1}$ . Сильные интенсивные сигналы карбоксилат-ионов наблюдаются в интервале частот  $2954$ ,  $2917$  и  $2849 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует асимметричным и симметричным колебаниям C-O. Как и в случае с композицией (Al + 5% ПВС), присутствует полоса поглощения, связанная с группой Al-O, но она смещена с  $1018,93 \text{ см}^{-1}$  до  $1022,41 \text{ см}^{-1}$ . Также наблюдаются слабые сигналы на правом склоне основной полосы  $\text{CH}_2$  (маятниковое колебание) в диапазоне  $770\text{--}720 \text{ см}^{-1}$ .

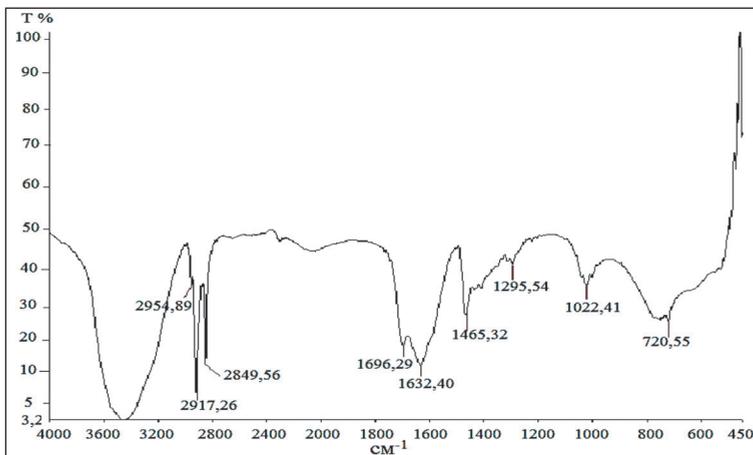


Рисунок 4 – ИК спектры композиции Al + 5%  $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$  после МХО

При увеличении содержания стеариновой кислоты в обрабатываемой системе до 20 % наблюдается рост интенсивности полос поглощения, связанных с гидроксильными группами, особенно при частотах  $3464$  и  $1701 \text{ см}^{-1}$  (рисунок 5). Также фиксируется значительное усиление сигналов от валентных асимметричных колебаний алифатических групп  $-\text{CH}_3$  ( $2955 \text{ см}^{-1}$ ) и валентных симметричных колебаний алифатических групп  $-\text{CH}_2$  ( $2849 \text{ см}^{-1}$ ). Частоты поглощения  $1346$  и  $1431 \text{ см}^{-1}$  соответствуют карбонильным группам, а полоса при  $1701 \text{ см}^{-1}$  связана с валентными колебаниями групп  $\text{C}=\text{O}$ . В сравнении с образцом, содержащим 5 % стеариновой кислоты в композите Al + 20%  $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ , явно выражены интенсивные полосы низкочастотных колебаний групп  $-\text{CH}$  в диапазоне  $720\text{--}540 \text{ см}^{-1}$ . Вместо полос, связанных с Al-O, появляются полосы поглощения деформационных колебаний Al-O-Al в диапазоне частот  $990\text{--}715 \text{ см}^{-1}$ . В результате МХО алюминия со стеариновой кислотой в концентрации 20 % наблюдается усиление сигналов практически всех групп, включая  $-\text{OH}$ ,  $-\text{CH}_2$ ,  $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{C-O}$  и  $-\text{C}=\text{O}$ .

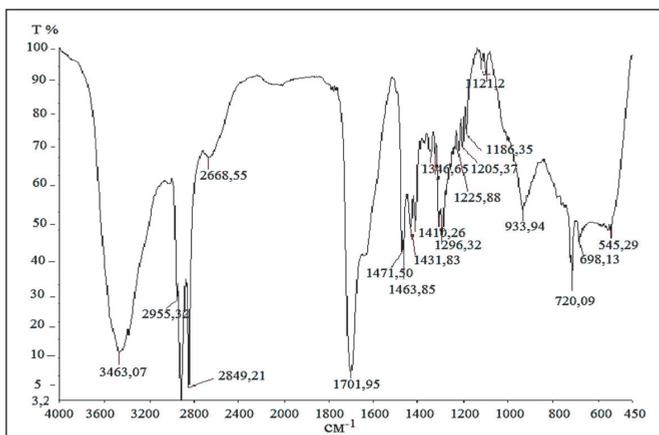


Рисунок 5 – ИК спектры композиции Al + 20 % C<sub>17</sub>H<sub>35</sub>COOH после МХО

Анализ инфракрасной спектроскопии показал, что механохимическая обработка алюминия приводит к изменениям в структуре его поверхностного слоя, что находит отражение в ИК-спектрах. Эти изменения включают появление новых полос поглощения, смещение частот и деформацию существующих полос. В процессе МХО алюминия с органическими добавками формируются несколько типов активных центров, которые способны участвовать в химических реакциях. Эти активные центры делают обработанные композиции пригодными для использования в твердофазном горении.

На *рисунке 6* показан результат термического анализа алюминиевого образца. При нагревании до 600 °С масса образца уменьшается на 3,52%, что, вероятно, связано с удалением гидроксидного слоя с поверхности порошка. Плавление алюминия происходит при 665,6 °С. Перед этим процессом, при температуре 647,4 °С, наблюдается экзотермическая реакция, вызванная окислением алюминия. При дальнейшем повышении температуры до 909 °С фиксируется увеличение массы образца на 2,59%, что может быть связано с поглощением азота жидким алюминием и образованием нитрида алюминия.

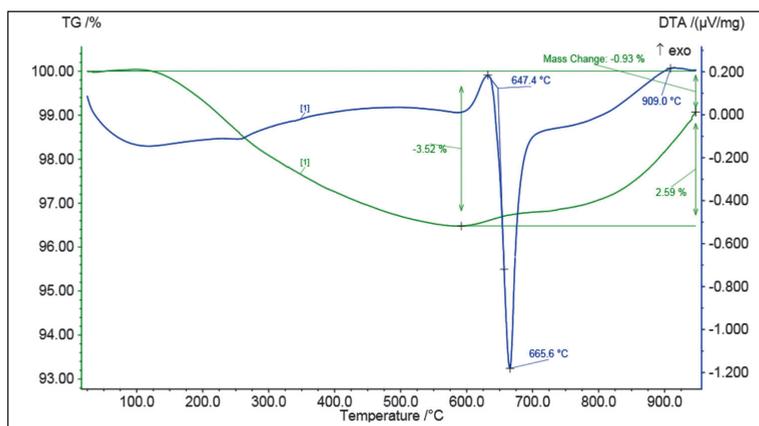
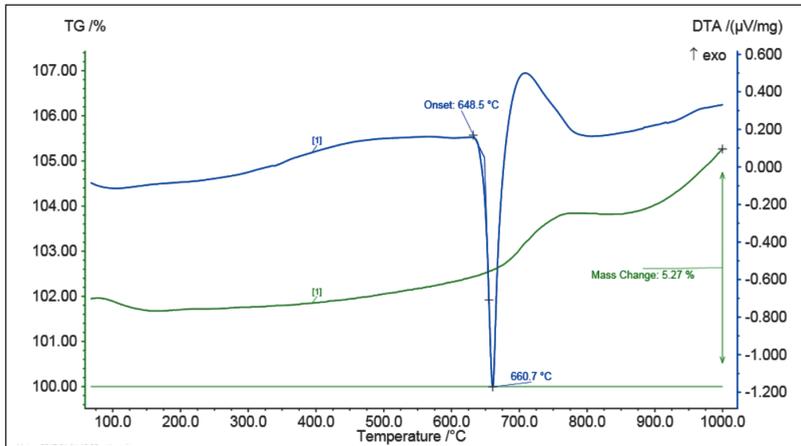


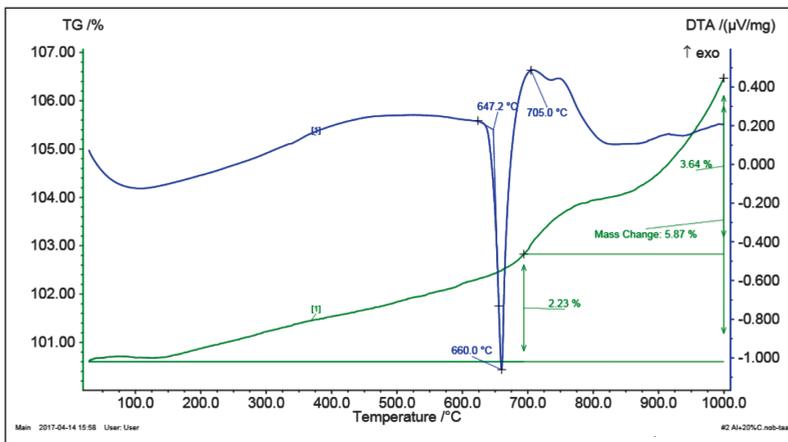
Рисунок 6 – Термогравиметрический анализ исходного алюминия

На *рисунке 7* показаны результаты термического анализа алюминиевых композитов с 5% и 20% содержанием графита после МХО. В образце Al + 5% C не наблюдается окисления алюминия при нагревании. Вместо этого, после достижения температуры плавления 660 °С, вероятно происходит образование карбида алюминия.



**Рисунок 7 – Термогравиметрический анализ композита Al + 5% C после МХО**

Когда содержание графита в композитах достигает до 20%, термическое поведение при нагреве повторяет поведение образца с 5% графита. В этом случае карбидизация алюминия стартует при 705 °С и продолжается до 770 °С. После завершения этой стадии начинаются реакции взаимодействия с азотом, что приводит к увеличению массы образца на 5,87% (*рисунк 8*).



**Рисунок 8 – Термогравиметрический анализ композита Al + 20% C после МХО**

Термографический анализ алюминия после МХО с поливиниловым спиртом показал, что при температуре выше 329 °С происходит деструкция спирта и снижение массы до 500 °С составляет 16,93 %, т.е. происходит почти полное разложение органической добавки (*рисунк 9 а*).

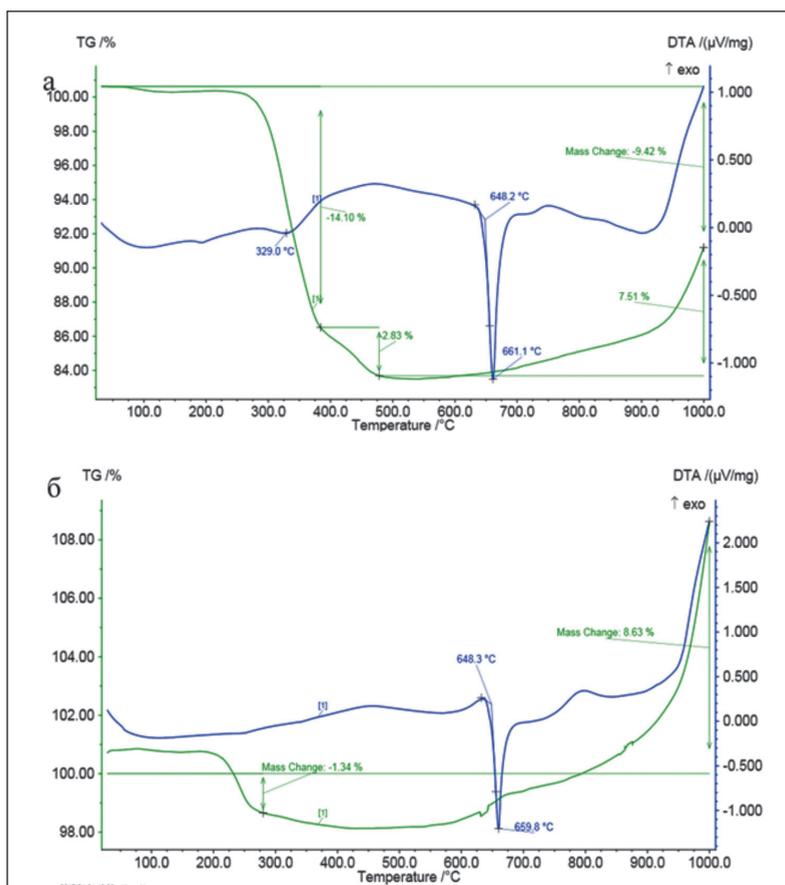


Рисунок 9 – Термогравиметрический анализ композитов.  
 а) Al+20% (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>OH)<sub>n</sub> после МХО; б) Al+5% C<sub>17</sub>H<sub>35</sub>COOH после МХО

На рисунке 9б представлены кривые ТГ образца Al+5% C<sub>17</sub>H<sub>35</sub>COOH. При температуре выше 900 °С наблюдается значительное тепловыделение и увеличение массы на 8,63%, что свидетельствует об активной реакции между модификатором и алюминием.

Эти данные термогравиметрического анализа показывают, что механохимическая обработка изменяет реакционную способность алюминиевых порошков как при взаимодействии с газами, так и с твердыми компонентами системы.

Таким образом, анализ ИК-спектроскопии и термогравиметрии активированного и модифицированного алюминиевого порошка выявил, что механохимическая обработка приводит к заметным изменениям в спектральных характеристиках. Эти изменения проявляются в виде появления новых спектральных линий, смещения частот и деформации полос. Также наблюдается усиление взаимодействия с различными компонентами системы. Изменения в интенсивности полос поглощения свидетельствуют о влиянии механохимической обработки на реакционную способность порошка.

Полученные модифицированные порошки алюминия применяли в составе газогенераторов. В результате проведенных тестов по определению скорости горения газогенераторных составов с добавлением механоактивированных порошков алюминия со стеариновой кислотой показали увеличение скорости горения на 25 % при 10 атм. Рецептуры порошков алюминия с поливиниловым спиртом после МХО горение состава происходит с взрывным эффектом. Такие системы рекомендуется использовать в композициях для газогенераторов.

**Заключение и выводы.** Механохимическая обработка алюминиевых порошков с различными модификаторами привела к заметным улучшениям их характеристик. Максимальные значения насыпной плотности были достигнуты при 20-минутной обработке алюминия с 5% поливиниловым спиртом. Инфракрасная спектроскопия показала значительное изменение поверхностной структуры: 20-минутная обработка алюминия с 5% графитом выявила новые полосы поглощения C-H, а 20-минутная обработка с 20% поливиниловым спиртом – усиление полос гидроксильных групп и карбоксилат-ионов. Термогравиметрический анализ показал, что массы образцов меняются в зависимости от модификатора, с уменьшением до 16,93% при поливиниловом спирте и увеличением на 8,63% при стеариновой кислоте. Эти изменения подтверждают значительное улучшение кинетики горения, что делает модифицированные порошки более эффективными для применения в газогенераторных составах для нефтягазовых скважинах. 

*Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19680387).*

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Меркулов А.А. Научные основы создания эффективной гидродинамической связи скважины с пластом с использованием энергии взрыва. Дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 2016. <https://www.disserscat.com> [Merkulov A.A. Nauchnye osnovy sozdaniya effektivnoy gidrodinamicheskoy svyazi skvazhiny s plastom s ispol'zovaniem energii vzryva. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. – Moskva, 2016.]
- 2 Патент на полезную модель № 9644 РК. Смесевая твердотопливная композиция на основе алюминия / Садықов Б.С, Баққара А.Е., Артықбаева А.Е., Осеров Т.Б. – 2023. [Patent na poleznuyu model' № 9644 RK. Smesevaya tverdotoplivnaya kompoziciya na osnove alyuminiya / Sadykov B.S, Baqqara A.E., Artyqbaeva A.E., Oserov T.B. – 2023.]
- 3 Vadhe P.P, Suresh M., Rahujade N.H., Talawar M.B., Kumar A. Effect of aluminium content on relative detonation pressure of polymer bonded explosive formulations // Aero. Sci. Technol. – 2023. V.75. N.3A. P. 369-376. Retrieved from <https://www.joast.org/index.php/joast/article/view/904>
- 4 Zygmunt A., Gańczyk K., Kasztankiewicz A., Cieślak K., Gołofit T. Application and properties of aluminum in primary and secondary explosives // J. Elem. – 2017. – V.22, n.2. – P.747-756. <https://doi.org/10.5601/jelem.2016.21.3.1073>.
- 5 Chen Y., Xu S., Wu D.J., Liu D.B. Experimental study of the explosion of aluminized explosives in air // Cent. Eur. J. Energ. Mater. – 2016. – V.13, n.1. – P.117–134.
- 6 Sielicki P.W., Clutter J.K., Sumelka W., Gajewski T., Malendowski M., Peksa P., Studziński R. Identification of aluminium powder properties for modelling free air explosions // Materials. – 2022. – V.15.1294. <https://doi.org/10.3390/ma15041294>

- 7 Joshi A., Mer K.S., Bhattacharya S., Patel V.K. Nano-aluminium as catalyst in thermal decomposition of energetic materials // Nano-Energ. Mater. – 2019. – P. 109-120. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3269-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3269-2_5)
- 8 Thiruvengadathan R. Aluminum-based nano-energetic materials: state of the art and future perspectives // Nano-Energ. Mater. – 2019. – P. 9–35. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3269-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3269-2_2)
- 9 Sadeghipour S., Ghaderian J., Wahid M. Advances in aluminum powder usage as an energetic material and applications for rocket propellant // AIP Conf. Proc. – 2012. – N1440. – P. 100-108. <https://doi.org/10.1063/1.4704207>
- 10 Wu X.L., Xia Y., An S., Luo Y., Wang J.H., Li Y, Luo Y.M. Hazard evaluation of ignition sensitivity and explosion severity for aluminum and aluminum powder-petroleum ether mixtures // Defence Technology. – 2024. – V. 17. – I. 4. – P. 1262-1268. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.06.011>
- 11 Muravyev N., Frolov Y., Pivkina A., Monogarov K., Ordzhonikidze O., Bushmarinov I., Korlyukov A. Influence of particle size and mixing technology on combustion of HMX/Al compositions // Propellants, Explos, Pyrotech. – 2010. – V. 35(3). – P. 22632. <https://doi:10.1002/prop.201000028>
- 12 Yang X., Wang XF., Huang YF., Feng XJ., Tian X., Feng Bo., Zhao K., Li WX. Effect of Al content on the explosion field pressure and temperature of HMX-based explosives in vacuum environment // Chin J Explos Propellants. – 2017. V. 40(6). P.73-77. <https://doi:10.14077/j.issn.1007-7812.2017.06.012>
- 13 Huang YF., Tian X., Feng Bo., Wang XY. Effect of particle size and shape of aluminum powder on the explosion field pressure and temperature of RDX- based explosive in vacuum environment // Chin J Energetic Mater. – 2016. – V. 24. – N.2. – P.144. <https://DOI:10.11943/j.issn.1006-9941.2016.02.006>
- 14 Jin PG., Guo W., Wang JL., Ren ST., Gao Z., Wang XF. Energy Releasing characteristics of aluminium powder in HMX-based explosives // Chin J Energetic Mater. – 2015. – V. 23. – N.10. – P.989-993. <https://DOI:10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.013>
- 15 Feng X.-J., Wang X.-F., Li Yuyuan., Xu H.-T. Effect of aluminum particle size and explosion atmosphere on the energy of explosion of aluminized explosive // Chin J Explos Propellants. – 2013. – V.36. – N.6. – P.24-27.
- 16 DeLuca L.T. Overview of Al-based nanoenergetic ingredients for solid rocket propulsion // Def. Technol. – 2018. – V.14. – P.357-365. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.06.005>
- 17 Ramakrishnan M., Chakravarthy S.R., Kandasamy J., Sarathi R. Development of nano-Al based highly metalized fuel-rich propellant for water ramjet propulsion applications, propellants explos // Pyrotech. – 2020. – V. 45. – P. 1026-1040. <https://doi.org/10.1002/prop.201900384>
- 18 Bakkara A.E., Sadykov B.S., Artykbaeva A.B., Kamunur K., Batkal A.N., Kalmuratova B. Energy-Intensive Materials with Mechanically Activated Components // ChemEngineering. – 2023. – V. 7, – n. 5. – P. 97. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7050097>.
- 19 Jiang F., Wang X.F., Huang Y.F., Fend B., Xuan T., Niu Y.I., Zhang K. Effect of particle gradation of aluminum on the explosion field pressure and temperature of RDX-based explosives in vacuum and air atmosphere // Defence Technology. – 2019. – V.15, n. 6. – P. 844-852. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.007>