

УДК 536.46

НОВЫЕ НАНОУГЛЕРОДНЫЕ ЭНЕРГОЕМКИЕ МАТЕРИАЛЫ

З. А. Мансуров^{1,2}, М. К. Атаманов³, Ж. Елемесова^{1,2}, Б. Т. Лесбаев^{1,2},
М. Н. Чикрадзе⁴¹Институт проблем горения, 050012 Алматы, Казахстан, zmansurov@kaznu.kz²Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, 050078 Алматы, Казахстан³Северо-западный политехнический университет, Сиань, Китай⁴Горный институт им. Г. Цулукидзе АН Грузии, Тбилиси 0186, Грузия

Методом дифференциального термического анализа исследовано влияние активированных углей с многослойными графенами (три и более слоев) на термическое разложение состава на основе нитрата гидроксилламмония и карбоксиметилцеллюлозы. Показано, что добавка активированного угля с многослойными графенами приводит к увеличению до четырех раз скорости горения нитрата гидроксилламмония. Установлено снижение температуры и времени химической реакции до полного разложения нитрата аммония при добавке активированных углей в процессе термического разложения.

Ключевые слова: графен, активированный уголь, нитрат аммония, нитрат гидроксилламмония, термическое разложение, скорость горения.

DOI 10.15372/FGV20190405

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день углеродсодержащие наноматериалы являются одними из наиболее популярных материалов для научных исследований. В одной из первых работ [1] по применению в топливах углеродсодержащих материалов, в частности углеродных нанотрубок, было достигнуто заметное увеличение скорости горения высокоэнергетичных топлив при включении в их состав от 1 до 15 % углеродных нанотрубок. В более поздней работе [2] установлено, что применение углеродных нанотрубок в смеси с углеводородными топливами приводит к повышению КПД топлив в двигателях внутреннего сгорания.

В качестве технологической добавки в ракетные топлива, наряду с углеродными нанотрубками, были исследованы частицы оксидов графена и графита [3]. Работы по применению частиц графена в составе различных топлив являются относительно новыми [4–8]. Результаты исследований по добавлению многослойных графенов для улучшения характеристик горения топлив представлены в работе [9], где для повышения скорости горения нитрометана наноразмерные частицы алюминия и оксида кремния были заменены дисперсными ча-

стицами графена. Установлено, что частицы многослойного графена проявляют каталитическую активность при разложении нитрометана и непосредственно принимают участие в реакции горения, повышая температуру и скорость реакции топлива, т. е. являются промоторами.

Широко известна практика применения активированных углей в качестве технологической добавки в композиции металлизированных и неметаллизированных топлив [10]. В работе [11] отмечалось, что активированный уголь, введенный в состав алюминизированных твердых топлив, является эффективным модификатором скорости горения. В работе [12] показана перспективность активированного угля для использования в качестве потенциального модификатора скорости горения для большинства неметаллизированных твердых топлив. Было установлено, что добавление небольшого количества (0.4 %) древесного угля существенно повышает скорость горения алюминизированных смесевых топлив. Активированный уголь вместе с переходными металлами и их оксидами (Fe_2O_3 , CuO) проявляет синергетический эффект и увеличивает скорость горения примерно в пять раз, до $r_b = 54$ мм/с при давлении $p_0 = 7$ МПа по сравнению с базовым составом ($r_b = 11$ мм/с при $p_0 = 7$ МПа).

В последнее время в качестве техно-

логических добавок к топливу привлекают внимание металлоорганические структуры, отличающиеся высокопористой кристаллической структурой, высокой удельной поверхностью (до 4000 м²/г) и возможностью управления физико-химическими свойствами путем внедрения металлических центров. По существу, металлоорганические структуры являются прекурсорами для изготовления наноструктурированных углеродных каркасов с металлическими частицами внутри [13, 14]. Однако способ изготовления этих объемных полимеров является дорогостоящим и многоступенчатым процессом.

В связи с этим представляет интерес поиск альтернативных методов получения технологических добавок с высокоразвитой поверхностью, в частности многослойных графенов [15–17]. Целью настоящей работы является разработка метода синтеза многослойных графенов из растительного сырья и использование их в качестве энергетических добавок для промотирования термического разложения и горения нитрата гидроксиламмония и нитрата аммония.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследование поверхности образцов проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа Quanta 3D 200i Dual System и растрового электронного микроскопа JSM-6490LA JEOL. Для получения информации об элементном анализе исследуемых материалов использовалась энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDAX) совместно со сканирующей электронной микроскопией.

Для получения рамановских спектров использовался спектрометр NTEGRA Spectra Raman ($\lambda = 473$ нм, сигнал с площади диаметром 80 нм).

Для проведения термического анализа применялся модулированный ДТА-ТГ прибор Rigaku TG8120, работающий в интервале температур от -180 до $+725$ °С со скоростью нагрева $0.1 \div 25$ К/мин, с погрешностью измерения температуры ± 0.3 К и массы ± 0.2 мг, с максимальной рабочей массой до 200 мг. Скорость нагрева в приборе варьировалась в диапазоне $5 \div 20$ К/мин. Для исключения влияния воздуха на получаемые термограммы опыты выполняли в среде азота (скорость подачи азо-

та 100 см³/мин). Образцы помещали в алюминиевые тигли с вертикальной загрузкой.

Сжигание образцов проводили в вертикально ориентированной стальной камере высокого давления. Для достижения высокого давления использовался азот из внешнего источника. Процесс горения регистрировался высокоскоростной камерой Photron-FASTCAM со скоростью съемки до 1000 кадр/с и разрешением 640×488 пикселей. Данная аппаратура позволяет регистрировать горение образцов в динамическом режиме от инициирования до момента полного сгорания.

Исследуемые активированные угли с содержанием многослойных графенов получали из рисовой шелухи (РШ). Схема синтеза активированных углей с многослойными графенами показана на рис. 1.

РШ промывается водой для удаления примесей, пыли, мусора и высушивается в печи. Далее проводится предварительная карбонизация РШ в железном реакторе в инертной среде. Карбонизированная РШ погружается в раствор КОН для удаления SiO₂, после чего раствор декантируется для удаления гидроксида калия, заново смешивается с чистым раствором КОН и переносится в реактор для активации при 850 °С. Далее полученный активированный уголь промывается дистиллированной водой методом кипения — осаждения — декантации с циклом $10 \div 15$ раз до достижения уровня pH = 7. Затем уголь подвергают 6-часовой сушке в сушильной печи до полного обезвоживания.

Для экспериментального исследования был взят стандартный реактив мелкодисперсной соли нитрата аммония (химический чистый), имеющий характерную для кристаллов соли азотной кислоты морфологию поверхности и размер частиц в диапазоне $100 \div 250$ мкм. Предварительно он был обезвожен и герметично упакован.

В работе использовался 95%-й водный раствор нитрата гидроксиламмония (НГА) компании «Nosoya», Токио, Япония, молекулярная масса 96.04 г/моль, плотность 1.84 г/см³.

В качестве гелеобразующего компонента для НГА применялась карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ, $[(C_6H_7O_2(OH)_3-x(OCH_2COOH))x]_n$) — водорастворимое, биоразлагаемое и биосовместимое производное целлюлозы с карбоксиметильными группами ($-CH_2-COOH$), связанными с некоторыми

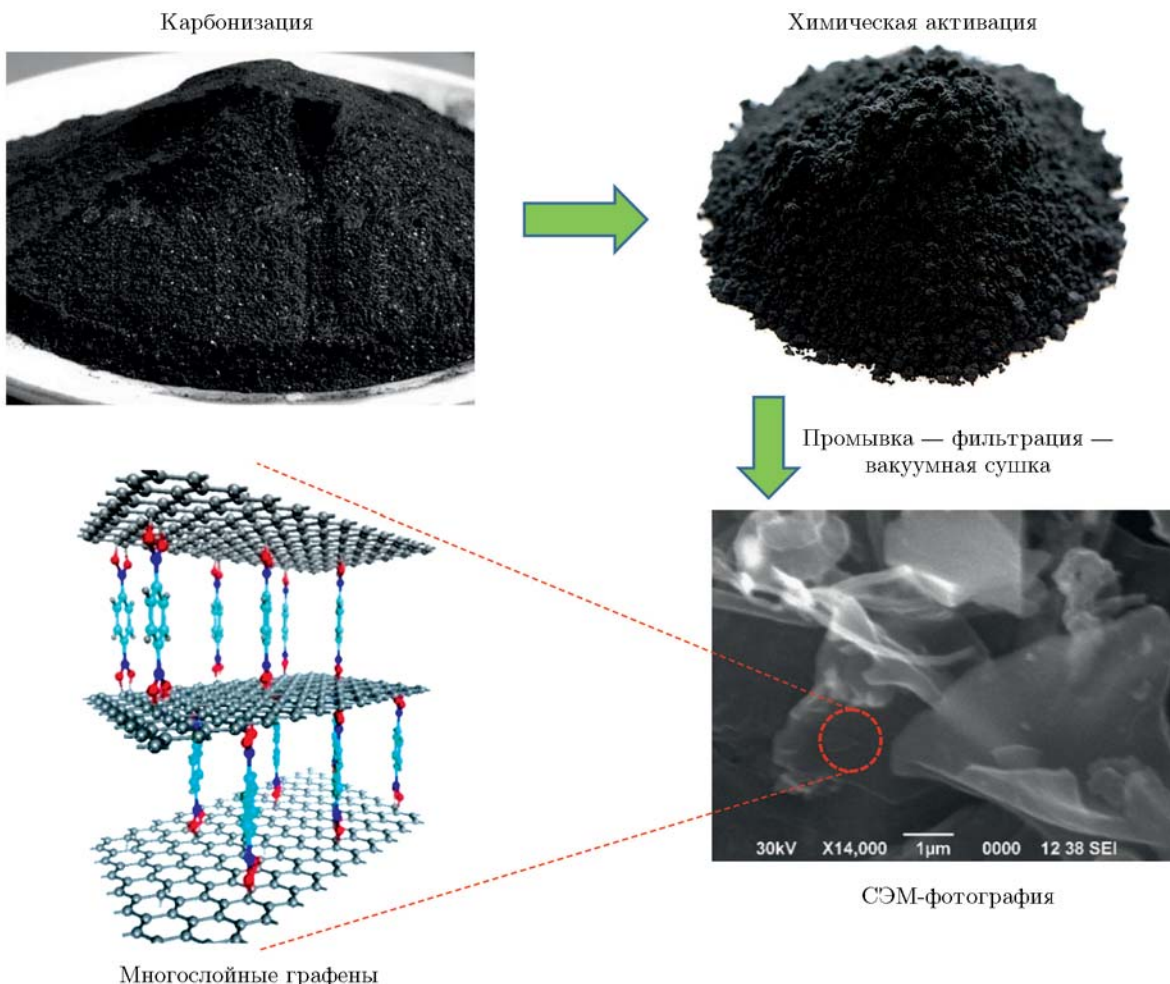


Рис. 1. Схема процесса получения активированных углей с графеновыми слоями

гидроксильными группами мономеров глюкопиранозы. Ее гидрофильные карбоксильные или гидроксильные группы служат активными центрами для получения гелей КМЦ [18, 19]. Твердый порошок КМЦ смешивали с НГА в миксере и получали гелеобразные полутвердые образцы.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Физико-химические характеристики добавок на основе рисовой шелухи

В настоящей работе активированный уголь, полученный из РШ, исследовался по методике, совмещающей в себе два способа оценки микро- и наноструктурированных объектов: сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и рамановскую спектроскопию, что позволяет оценить топологию сформированной уг-

леродной структуры, количество слоев, имеющих в составе частиц графена, присутствие химических примесей и дефектность структуры.

На СЭМ-фотографии угля на рис. 1 видны частицы с характерной для графена структурой, имеющие скомканную полупрозрачную поверхность. Слои содержат дефекты и включения твердых углеродных компонентов, однако встречаются участки без дефектов, с однородной структурой поверхности. Элементный состав активированного угля указывает на эффективное удаление (посредством химической активации и промывки) кремниевых примесей, что говорит об исключительно высокой концентрации углеродной составляющей. Можно заключить, что полученный активированный уголь имеет характерную морфологию поверхности, заданную исходным сырьем (РШ), и обладает развитой удельной поверх-

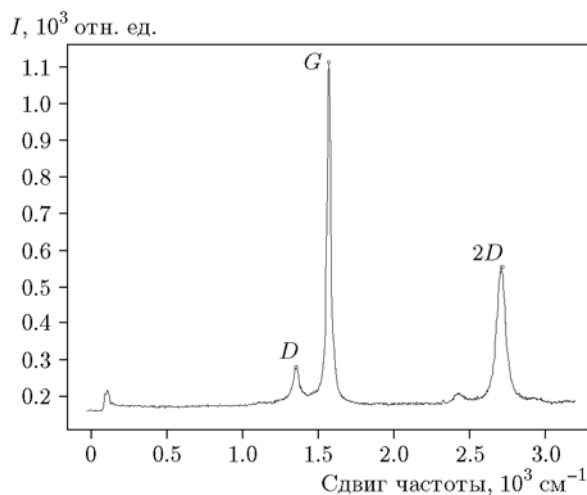


Рис. 2. Рамановские спектры активированного угля, полученного из рисовой шелухи

ностью ($3000 \text{ м}^2/\text{г}$) с большим количеством микро- и мезопор.

Известно, что рамановская спектроскопия является одним из информативных методов для исследования углеродных структур с высокой степенью графитизации [20–23]. В данной работе такое исследование проводилось с длиной волны 473 нм в 6–7 точках образца. Как видно из спектров на рис. 2, полученный углеродный материал состоит из анизотропных неупорядоченных углеродных структур и значительного количества многослойных графеновых структур. Интенсивность пиков G и $2D$ позволяет заключить, что графеновая пленка состоит из трех или более слоев ($I_{2D}/I_G = 0.63$). На всех спектрах присутствуют пики D , G и $2D$, что свидетельствует о наличии деформаций в кристаллической структуре графеновой пленки, а также о наличии механических напряжений. Детальное изучение результатов спектроскопии комбинационного рассеяния показало, что полученный образец из рисовой шелухи состоит из многослойного графена с содержанием аморфных компонентов угля.

2.2. Влияние активированного угля на разложение и горение нитрата гидроксиламмония

Термодинамический расчет адиабатической температуры горения нитрата гидроксиламмония в присутствии графитизированного углерода, как наиболее близкого по характе-

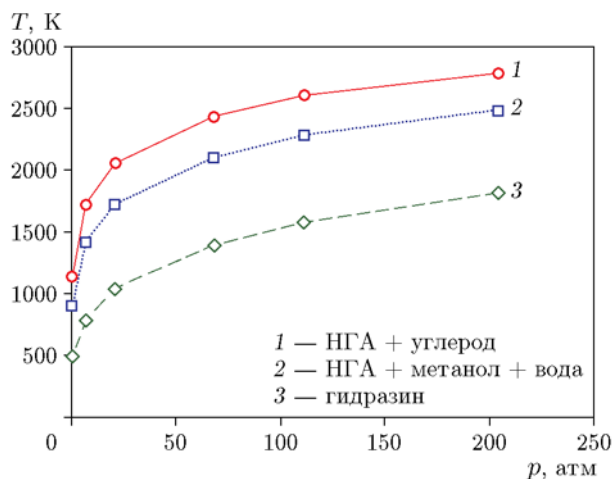


Рис. 3. Расчет адиабатической температуры горения НГА при различных значениях избыточного давления на входе в сопло (по программе NASA-CEA)

ристикам к применяемому в работе активированному углю, выполнен с использованием программы химического равновесия NASA — Chemical equilibrium and application (CEA) [24]. Энтальпия образования НГА, по данным работы [25], составляет -79.68 ккал/моль . Выбрано стандартное соотношение выходного и критического сечений сопла $A_e/A_t = 50 : 1$. На рис. 3 приведены результаты расчета адиабатической температуры горения составов 90 % НГА + 10 % графитизированного углерода, 90 % НГА + 7 % метанола + 3 % воды и широко используемого ракетного топлива гидразина в зависимости от давления на выходе из сопла ракетного двигателя. Смеси на основе НГА демонстрируют высокие значения адиабатической температуры горения. Например, для состава НГА + углерод она равна 2800 К . По сравнению с гидразином это выше примерно на 30 %. Ранее в работе [26] была получена расчетная адиабатическая температура горения 95%-го водного раствора НГА — 2500 К .

По результатам расчетов [27] аморфный углерод имеет низкий термодинамический потенциал. Его повышают путем механохимической обработки и диспергирования до наноразмеров. Расчеты были проведены только с графитизированным углеродом. Поскольку исследуемые активированные угли имеют высокую степень графитизации (см. рамановские спектры на рис. 2), использование свойств графит-

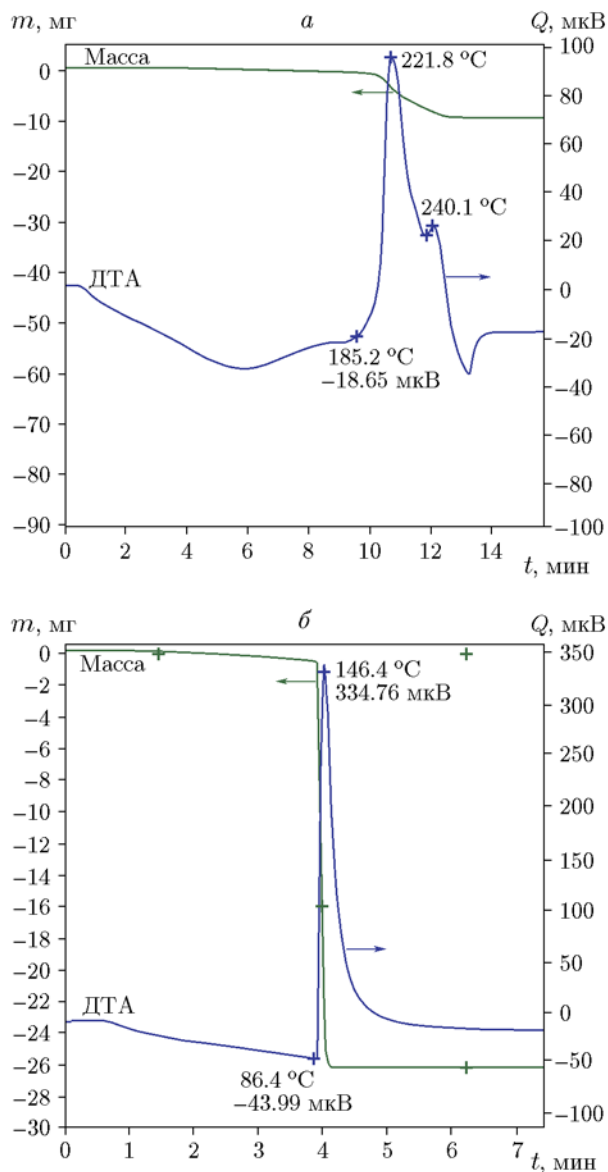


Рис. 4. Термическое разложение чистого 95%-го водного раствора НГА (а) и 95%-го водного раствора НГА с добавкой 10 % активированного угля с многослойными графенами (б)

тизированного углерода для проведения оценок температуры горения смеси НГА и угля вполне обосновано.

На рис. 4 представлены экспериментальные данные о влиянии добавки активированного угля с многослойными графенами на термическое разложение 95%-го водного раствора НГА при скорости нагрева 20 К/мин в потоке азота (100 мл/мин).

При разложении чистого водного раствора НГА происходит дегидратация вещества

с поглощением тепла, регистрируемая в виде широкого эндотермического пика, который плавно переходит в экзотермический пик (см. рис. 4). Термическое разложение 95%-го водного раствора НГА протекает в два основных этапа: 1) эндотермическая реакция с поглощением тепла для испарения присутствующей в НГА воды и декомпозиции первичных продуктов разложения НГА (HNO_3 , NH_2OH); 2) экзотермическая реакция разложения НГА с максимумом при температуре 221 °С.

На рис. 4,б приведен результат ДТ-ТГ-анализа термического разложения 95%-го водного раствора НГА с добавкой активированного угля 10 % от общей массы. Наблюдается значительное, более чем в два раза, снижение начальной температуры разложения: начало разложения инициируется при 86 вместо 185 °С (рис. 4,а). Кроме того, регистрируется поглощение тепла в виде прямой линии, нехарактерной для эндотермического разложения, как на рис. 4,а. Предполагается, что вода и первичные продукты разложения НГА сорбируются в поры и не имеют возможности испариться и покинуть пределы пор угля до достижения температуры инициирования экзотермического разложения. Наличие на термограмме только одного пика позволяет сделать заключение о возможности воздействия угля на механизм разложения НГА.

На рис. 5 приведены результаты влияния активированного угля с многослойными графенами на линейную скорость горения смеси 90 % НГА + 10 % КМЦ при различных значениях начального давления ($p_0 = 1 \div 5$ МПа).

В результате проведенных экспериментов (см. рис. 5) установлено, что добавление активированного угля в смесь НГА/КМЦ приводит к увеличению скорости горения состава почти в четыре раза: в смеси без угля $r_b = 13$ мм/с при $p_0 = 5$ МПа, тогда как в смеси с углем $r_b = 41$ мм/с при $p_0 = 5$ МПа. Очевидно, что активированный уголь промотирует реакцию горения двухкомпонентного состава НГА/КМЦ. Если горение смеси НГА/КМЦ начинается лишь при $p_0 = 3$ МПа, то в присутствии 1 % (от общей массы) активированного угля горение начинается уже при $p_0 = 1$ МПа. Горение образцов сопровождается ярким пламенем с выделением большого количества оранжевого дыма (диоксид азота). Горение НГА сопровождается образованием большого объема газов, состоящих преимущественно

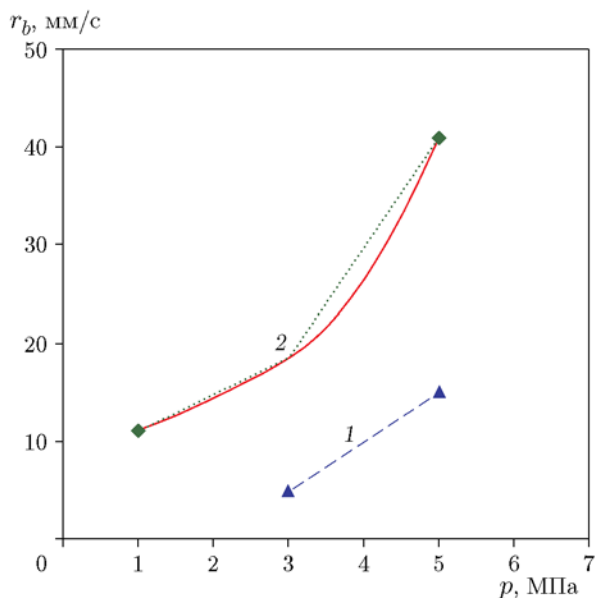


Рис. 5. Расчет линейной скорости горения исследуемых составов в зависимости от начального давления системы:

1 — НГА/КМЦ, 2 — НГА/КМЦ + активированный уголь

но из NO , NO_2 и N_2O [28]. В ракетной технике такие вещества, как НГА, используются в газогенераторах для создания избыточного давления. Активированный уголь и многослойные графены имеют на поверхности множество реакционноспособных центров в виде пор и дефектов, свободных атомов на углах и гранях, а также характеризуются большой удельной поверхностью. Считается, что на структурных неоднородностях, дефектах и порах углерода образуются активные центры, которые промотируют химические процессы. Можно предположить, что при разложении НГА в присутствии активированных углей именно в этих центрах происходит аккумуляция тепла, что, в свою очередь, поднимает температуру всей системы. Вышеперечисленные факторы, несомненно, играют роль в увеличении скорости окисления и скорости горения топлива [29].

Схема горения НГА с добавкой активированного угля в жидкой фазе при $p_0 = 6$ МПа представлена на рис. 6. Процесс характеризуется как конвективное горение, присущее горению большинства однокомпонентных жидких топлив. В присутствии активированного угля горение протекает более бурно, образуется турбулентное пламя, а также выделяется большой объем газов. Процесс горения происходит в

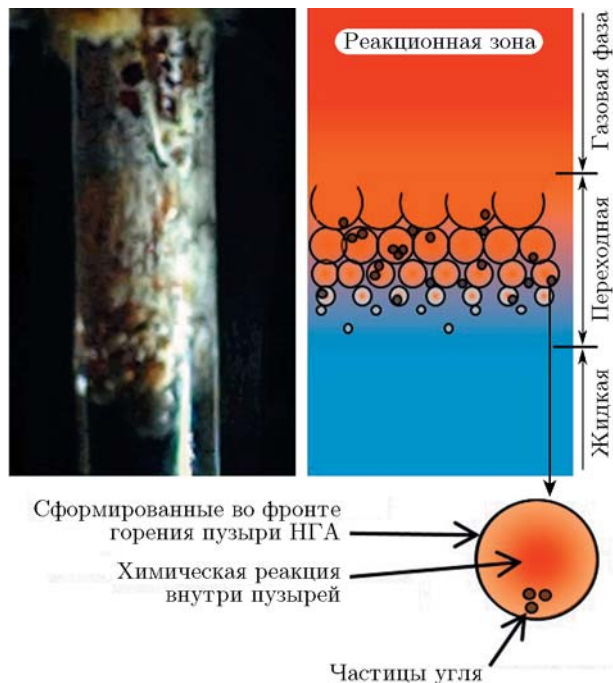


Рис. 6. Распространение волны горения при сжигании НГА в жидкой фазе при $p_0 = 6$ МПа

трех зонах (жидкость — смешанная зона, пузыри и газ — газ). Предполагается, что при этом частицы активированного угля находятся преимущественно внутри пузырей топлива, которые формируются при нагреве НГА, где и накапливается большое количество тепла за счет химической реакции разложения топлива [30].

ВЫВОДЫ

- Получен активированный уголь с высокой удельной поверхностью $3000 \text{ м}^2/\text{г}$, имеющий в составе многослойный графен $5 \div 10 \%$ (три и более слоев: $I_{2D}/I_G = 0.63$).
- Экспериментально определено, что добавление 1% активированного угля (от общей массы) к нитрату гидросиламмония приводит к увеличению скорости горения состава в четыре раза при начальном давлении 5 МПа.
- Установлено, что добавка 10% активированного угля, содержащего многослойные графены, является эффективным инициатором термического разложения нитрата гидросиламмония и способна снижать температуру начала разложения вещества до $86 \text{ }^\circ\text{C}$ вместо изначальных $185 \text{ }^\circ\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lijima S.** Helical microtubules of graphitic carbon // *Nature*. — 1991. — V. 354. — P. 56–58. — <https://doi.org/10.1038/354056a0>.
2. **Basha J. S., Anand R. B.** An experimental investigation in a diesel engine using carbon nanotubes blended water — diesel emulsion fuel // *J. Power Energy*. — 2011. — V. 225, N 3. — P. 279–288. — <https://doi.org/10.1177/2041296710394247>.
3. **Chehroudi B.** Applications of graphene in fuel // *Propellant Combustion: Graphene Science Handbook*. — CRC Press, 2016. — P. 391–398. — <https://doi.org/10.1201/b19488>.
4. **Fowler J. D., Allen M. J., Tung V. C., Yang Y., Kaner R. B., Weiller B. H.** Practical chemical sensors from chemically derived graphene // *ACS Nano*. — 2009. — V. 3, N 2. — P. 301–306. — <https://doi.org/10.1021/nm800593m>.
5. **Schniepp H. C., Li J.-L., McAllister M. J., Sai H., Herrera-Alonso M., Adamson D. H., Aksay I. A.** Functionalized single graphene sheets derived from splitting graphite oxide // *J. Phys. Chem. B*. — 2006. — V. 110, N 17. — P. 8535–8539. — <https://doi.org/10.1021/jp060936f>.
6. **McAllister M. J., Li J.-L., Adamson D. H., Schniepp H. C., Abdala A. A., Liu J., Aksay I. A.** Single sheet functionalized graphene by oxidation and thermal expansion of graphite // *Chem. Mater.* — 2007. — V. 19, N 18. — P. 4396–4404. — <https://doi.org/10.1021/cm0630800>.
7. **Ramanathan T., Abdala A. A., Stankovich S., Dikin D. A., Herrera-Alonso M., Piner R. D., Brinson L. C.** Functionalized graphene sheets for polymer nanocomposites // *Nature Nanotechnol.* — 2008. — V. 3, N 6. — P. 327–331. — <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.96>.
8. **Chehroudi B.** Nanotechnology and applied combustion: Use of nanostructured materials for light-activated distributed ignition of fuels with propulsion applications // *Recent Patents on Space Technology*. — 2011. — V. 1, N 2. — P. 107–122. — <https://doi.org/10.2174/1877611611101020107>.
9. **Sabourin J. L., Dabbs D. M., Yetter R. A., Dryer F. L., Aksay I. A.** Functionalized graphene sheet colloids for enhanced fuel/propellant combustion // *ACS Nano*. — 2009. — V. 3, N 12. — P. 3945–3954. — <https://doi.org/10.1021/nm901006w>.
10. **Ishitha K., Ramakrishna P. A.** Activated charcoal: as burn rate modifier and its mechanism of action in non-metalized composite solid propellants // *Int. J. Adv. Eng. Sci. Appl. Math.* — 2014. — V. 6, N 1-2. — P. 76–92. — <https://doi.org/10.1007/s12572-014-0112-z>.
11. **Verma S., Ramakrishna P. A.** Investigations on activated charcoal, a burn-rate enhancer in composite solid propellant // *J. Propul. Power*. — 2013. — V. 29, N 5. — P. 1214–1219. — <https://doi.org/10.2514/1.b34809>.
12. **Verma S., Ramakrishna P. A.** Activated charcoal — A novel burn rate enhancer of aluminized composite propellants // *Combust. Flame*. — 2010. — V. 157, N 6. — P. 1202–1210. — <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.11.017>.
13. **Di Capua R., Gargiulo V., Alfe M.** Graphene-like layers from unconventional carbon sources: New perspectives on hybrid materials and π -system synergisms // *Eurasian Chem.-Technol. J.* — 2016. — V. 18, N 4. — P. 263–274. — <https://doi.org/10.18321/ectj480>.
14. **Seo J. S., Whang D., Lee H., Jun S. I., Oh J., Jeon Y. J., Kim K.** A homochiral metal-organic porous material for enantioselective separation and catalysis // *Nature*. — 2000. — V. 404, N 1. — P. 982–986. — <https://doi.org/10.1038/35010088>.
15. **Srinivas G., Burrell J. W., Ford J., Yildirim T.** Porous graphene oxide frameworks: Synthesis and gas sorption properties // *J. Mater. Chem.* — 2011. — V. 30, N 30. — P. 11323. — <https://doi.org/10.1039/c1jm11699a>.
16. **Burrell J. W., Gadipelli S., Ford J., Simmons J. M., Zhou W., Yildirim T.** Graphene oxide framework materials: Theoretical predictions and experimental results // *Angew. Chemie*. — 2010. — V. 122, N 47. — P. 9086–9088. — <https://doi.org/10.1002/ange.201003328>.
17. **Рожков А. В.** Графен 2.0 // *Химия и жизнь* — XXI век. — 2017. — № 10. — С. 2–7.
18. **Liu H., Huang S., Li X., Zhang L., Tan Y., Wei C., Lv J.** Facile fabrication of novel polyhedral oligomeric silsesquioxane/carboxymethyl cellulose hybrid hydrogel based on supermolecular interactions // *Mater. Lett.* — 2013. — V. 90. — P. 142–144. — <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.09.030>.
19. **Zhang H., Tumarkin E., Peerani R., Nie Z. H., Sullan R. M. A., Walker G. C., Kumacheva E.** Microfluidic production of biopolymer microcapsules with controlled morphology // *J. Amer. Chem. Soc.* — 2006. — V. 128. — P. 12205–12210. — <https://doi.org/10.1021/ja0635682>.
20. **Seitzhanova M. A., Kerimkulova M. R., Shyntoreev E. B., Azat S., Kerimkulova A. R., Mansurov Z. A.** Development of the method for obtaining carbon ceramic adsorbents based on porous carbon // *Chem. Bull. Kazakh Nat. Univ.* — 2015. — N 2. — P. 37–41. — <https://doi.org/10.15328/cb569>.
21. **Jandosov J. M., Shikina N. V., Bisenbayev M. A., Shamalov M. E., Ismagilov Z. R., Mansurov Z. A.** Evaluation of

- synthetic conditions for H_3PO_4 chemically activated rice husk and preparation of honeycomb monoliths // Eurasian Chem. Technol. J. — 2009. — V. 11, N 3. — P. 245–252. — <https://doi.org/10.18321/ectj287>.
22. **Saito R., Hofmann M., Dresselhaus G., Jorio A., Dresselhaus M. S.** Raman spectroscopy of graphene and carbon nanotubes // Adv. Phys. — 2011. — V. 66, N 3. — P. 413–550. — <https://doi.org/10.1080/00018732.2011.582251>.
 23. **Atamanov M. K., Noboru I., Shotaro T., Amrousse R., Tulepov M. Y., Kerimkulova A. R., Hobosyan M. A., Hori K., Martirosyan K. S., Mansurov Z. A.** Investigation of combustion and thermal analysis of ammonium nitrate with carbonaceous materials // Combust. Sci. Technol. — 2016. — V. 118, N 11–12. — P. 2003–2011. — <https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1220143>.
 24. **McBride B. J., Gordon S.** Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications. — Washington, DC: NASA, 1996.
 25. **Ashcraft R. W., Raman S., Green W. H.** Ab initio aqueous thermochemistry: Application to the oxidation of hydroxylamine in nitric acid solution // J. Phys. Chem. B. — 2007. — V. 111, N 41. — P. 11968–11983. — <https://doi.org/10.1021/jp073539t>.
 26. **Кацуми Т., Кодама Х., Мацуо Т., Огава Х., Цубои Н., Хори К.** Характеристики горения жидкого топлива на основе нитрата гидроксиламмония. Механизм горения и приложение к ракетным двигателям малой тяги // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 4. — С. 109–120.
 27. **Guencheva V., Grantscharova E., Gutzow I.** Thermodynamic properties of the amorphous and crystalline modifications of carbon and the metastable synthesis of diamond // Crystal Res. Technol. — 2001. — V. 36, N 12. — P. 1411–1428. — [https://doi.org/10.1002/1521-4079\(200112\)36:12<1411::AID-CRAT1411>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1521-4079(200112)36:12<1411::AID-CRAT1411>3.0.CO;2-8).
 28. **Chehroudi B.** Minimum ignition energy of the light-activated ignition of single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) // Combust. Flame. — 2012. — V. 159, N 2. — P. 753–756. — <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.08.013>.
 29. **Sabourin J. L., Dabbs D. M., Yetter R. A., Dryer F. L., Aksay I. A.** Functionalized graphene sheet colloids for enhanced fuel/propellant combustion // ACS Nano. — 2019. — V. 12, N 3. — P. 3945–3954. — <https://doi.org/10.1021/nn901006w>.
 30. **Атаманов М. К., Амrousse Р., Хори К., Колесников Б. Я., Мансуров З. А.** Влияние активированного угля на термическое разложение нитрата гидроксиламмония // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 3. — С. 72–81. — DOI 10.15372/FGV20180308.

Поступила в редакцию 12.10.2018.

После доработки 15.02.2019.

Принята к публикации 20.02.2019.