

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 544.032.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗИФИКАЦИИ УРОТРОПИНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ГАЗООБРАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

© 2022 г. Е. А. Салганский^{1*}, А. Ю. Зайченко¹, Д. Н. Подлесный¹, М. В. Салганская¹,
М. В. Цветков¹, Ю. Ю. Цветкова¹

¹Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*E-mail: sea@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 11.03.2022;

после доработки 15.04.2022;

принята в печать 20.04.2022

В работе экспериментально исследовалась газификация твердого пористого горючего при фильтрации через него высокотемпературных газообразных продуктов. В качестве твердого горючего использовался сублимирующий материал – уротропин. Показано, что с ростом начальной температуры фильтрующегося газа время газификации уротропина снижается, а интенсивность процесса газификации горючего увеличивается, что приводит к увеличению потока продуктов газификации уротропина. В интервале температур 470–500 К происходила интенсивная газификация уротропина, при этом температура выходящих газообразных продуктов изменялась слабо. Содержание водорода в газообразных продуктах достигало 7 об. %

Ключевые слова: низкотемпературный газогенератор, уротропин, газификация, высокоскоростной летательный аппарат, образование водорода.

DOI: 10.31857/S0207401X22110097

ВВЕДЕНИЕ

Низкотемпературные газогенераторы широко применяются в различных приложениях: для раскрутки турбин [1–3], в системах пожаротушения [4–6], в подушках безопасности [7, 8] и др. В зависимости от области применения газогенератора к нему предъявляются различные требования: высокая газопроизводительность при минимальной теплоте сгорания [9], отсутствие горючих продуктов [10], максимальная калорийность газообразных продуктов [11, 12].

Низкотемпературный газогенератор для производства калорийных газообразных продуктов может применяться в двигателе высокоскоростных летательных аппаратов с внутритатмосферным применением [13, 14]. Для реализации таких летательных аппаратов разрабатываются силовые установки на основе прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) [15–17]. Для работы двигателей могут быть использованы как жидкие [18], так и газообразные [19], и твердые топлива [11, 20, 21]. Изучение режимов работы ПВРД проводятся как с помощью моделирования [22–24], так и экспериментальных стендов [25, 26].

У высокоскоростных летательных аппаратов забортный воздух не может использоваться в ка-

честве охладителя камеры сгорания вследствие высокой температуры торможения. Поэтому охладитель необходимо иметь на борту летательного аппарата. В качестве охладителя может быть использовано жидкое топливо либо продукты газификации твердого топлива [27, 28]. Главным преимуществом жидкого топлива является простота его подачи в систему охлаждения камеры сгорания. Однако жидкое топливо имеет меньшую объемную теплоту сгорания по сравнению с твердым, а следовательно, уступает последнему в дальности полета летательного аппарата. Реализация ПВРД на твердом топливе включает использование низкотемпературного газогенератора с целью получения высококалорийных газов [29, 30]. В работе [31] проведено экспериментальное изучение газификации полипропилена при фильтрации высокотемпературного инертного газа. Получено, что с увеличением температуры фильтрующегося газа увеличивается скорость газификации полипропилена. В эксперименте расход продуктов газификации достигал значения в 8 г/с, а отношение величин потоков азота к продуктам газификации было равно 4.5.

Известно, что режим и скорость термодеструкции веществ определяются температурными условиями процесса [32–34]. Поэтому цель

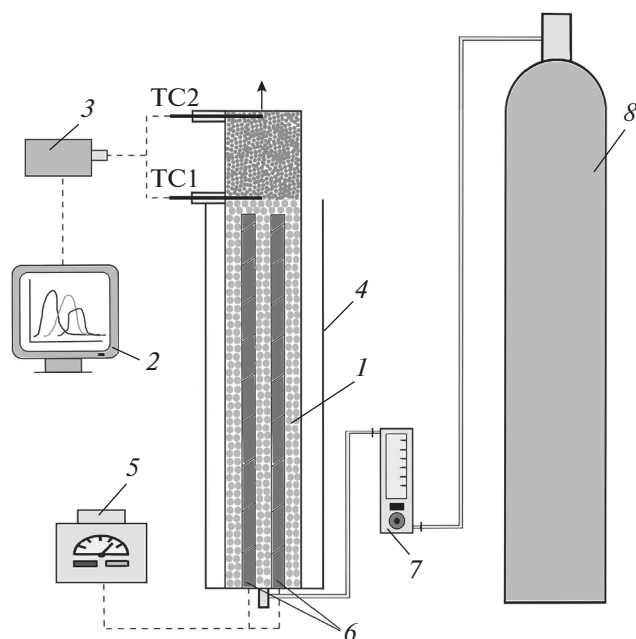


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – кварцевый реактор, 2 – ПК, 3 – АЦП, 4 – теплоотражающий алюминиевый экран, 5 – ЛАТР, 6 – нагревательный элемент, 7 – расходомер, 8 – баллон с азотом, TC1 и TC2 – термопары.

работы – экспериментальное исследование режимов газификации уротропина в низкотемпературном газогенераторе при различных значениях температуры фильтрующегося газа.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Низкотемпературный газогенератор на твердом топливе состоит из двух разделенных между собой камер. В одной из камер содержится источник потока горячих газообразных продуктов. Во второй камере располагается твердое пористое горючее (далее будем называть эту камеру газификатором). В этой камере происходит газификация пористого материала по аналогии с режимом фильтрационного горения [35–37]. Горячие газообразные продукты фильтруются через пористое горючее. При фильтрации горячих газов происходит газификация горючего, которая должна происходить в режиме сублимации, т.е. без плавления твердого материала. Плавление горючего может привести к перекрытию пор и прекращению фильтрации газов. При газификации горючего температура газов снижается, а их масса увеличивается за счет поступления продуктов газификации [38].

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В кварцевом реакторе 1 располагался омический нагревательный элемент 6. Внешний диаметр реактора равен 70 мм, внутренний – 66 мм. Часть реактора с нагревательным

элементом заполнялась частицами шамотного кирпича. Длина этой части была равна 35 см. Мощность тепловыделения нагревателя контролировалась заданием электрического напряжения через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 5. Для уменьшения боковых теплопотерь реактор экранировался теплоотражающей алюминиевой фольгой 4. Через нижний фланец в реактор подавался азот из баллона 8. Расход азота контролировался с помощью расходомера 7 марки “Mass-view” производства компании Bronkhorst High-Tech (Netherlands). Температуру измеряли в двух сечениях реактора хромель-алюмелевыми термопарами: TC1 – на выходе из шамотной засыпки, TC2 – на выходе из реактора. Сигнал с термопар через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 3 марки ZetLab передавался на персональный компьютер (ПК) 2. Засыпка из частиц твердого горючего загружалась в реактор между термопарами TC1 и TC2. Высота засыпки горючего составляла 10–15 см.

Методика проведения эксперимента состояла из следующих стадий. В начальный момент времени в реактор подавался газ с заданным расходом. В это же время на нагреватель подавалось напряжение. Предварительно провели калибровочные эксперименты для определения температуры газа в зависимости от напряжения на нагревателе. После выхода на установившееся значение показаний термопар в реактор загружалась засыпка горючего материала. В ходе эксперимента регистрировали температуру выходящих газовых продуктов из реактора, а также проводили отбор проб газообразных продуктов в ампулу-ловушку. Анализ газообразных продуктов проводили с помощью хроматографа “Хроматек-Кристалл 5000” (Россия). Также фиксировали общее время газификации горючего материала.

В качестве горючего материала использовали технический уротропин (ТУ 2478-014-74999404-2006). Последний при нагревании легко сублимируется и переходит в газовую фазу без плавления. Плавление горючего материала привело бы к закупориванию порового пространства и прекращению процесса фильтрации. Плотность уротропина равна 1143.8 кг/м³, средний размер его частиц составлял 5–10 мм. Масса одной засыпки уротропина составляла 200–250 г. В качестве фильтрующегося газа теплоносителя использовался азот. Расход азота задавался равным 0.6 л/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе эксперимента регистрировали температуру выходящих газовых продуктов из засыпки горючего, а также проводили отбор проб газообразных продуктов в ампулу-ловушку. Также фиксировали общее время газификации горючего материала для оценки ее средней массовой скорости.

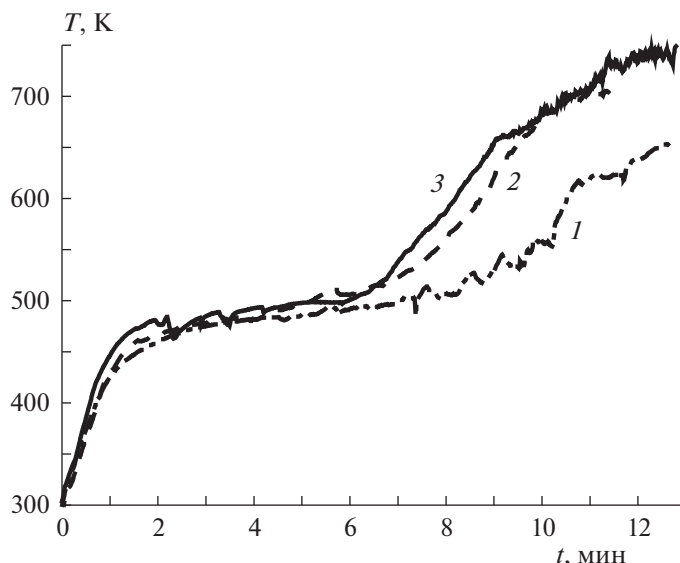


Рис. 2. Зависимость температуры на выходе из газификатора от времени для различных значений начальной температуры фильтрующегося газа: 1 – 670 К, 2 – 710 К, 3 – 740 К.

На рис. 2 представлена зависимость температуры на выходе из газификатора от времени для различных значений начальной температуры фильтрующегося газа. В данной серии экспериментов начальная температура азота составляла: кривая 1 – 670 К, кривая 2 – 710 К, кривая 3 – 740 К. В начальный момент времени засыпался горючий материал с температурой 298 К. После загрузки горючий материал прогревали, при этом температура выходящего газа увеличивалась. В интервале температур 470–500 К происходила интенсивная газификация уротропина, но температура выходящих газообразных продуктов при этом изменялась слабо. По мере расходования горючего температура выходящих продуктов газификации увеличивалась, достигая в итоге первоначальной температуры входящего в засыпку азота.

Из рис. 2 видно, что с увеличением начальной температуры фильтрующегося газа время газификации уротропина снижается. Полученный результат согласуется с выводами экспериментального исследования Шиплюка с соавт. [31]. В этой работе исследовалась газификация полипропилена при фильтрации высокотемпературного потока азота. Таким образом, с увеличением начальной температуры входящих газов снижается время работы газогенератора.

На рис. 3 представлена зависимость средней массовой скорости газификации уротропина от начальной температуры фильтрующегося газа. Рост температуры входящего азота от 670 до 740 К приводит к увеличению массовой скорости газификации уротропина с 0.29 до 0.38 г/с. Таким образом, с ростом начальной температуры входя-

щих газов увеличивается интенсивность процесса газификации горючего.

Выходящие из газификатора газообразные продукты поступают далее в систему охлаждения камеры сгорания двигателя. Поэтому они должны иметь, с одной стороны, низкую температуру, чтобы выступать в качестве охладителя, а с другой – достаточную калорийность, чтобы, поступая в камеру сгорания, обеспечивать тягу двигателя. На рис. 4 представлена зависимость отношения массовых потоков продуктов газификации уротропина и

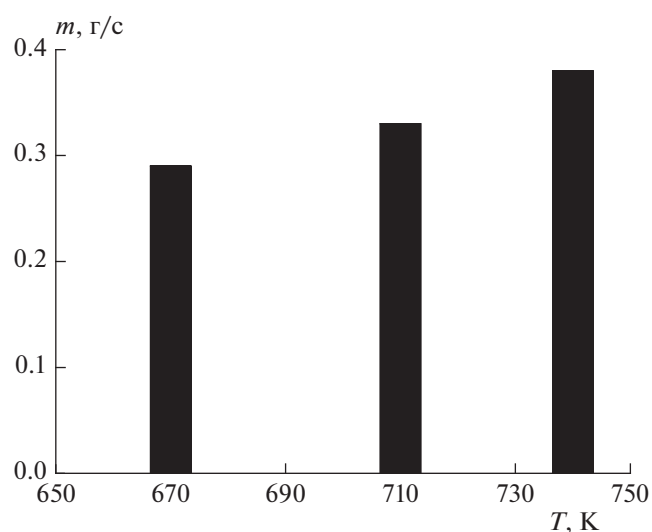


Рис. 3. Зависимость средней массовой скорости m газификации уротропина от начальной температуры фильтрующегося газа.

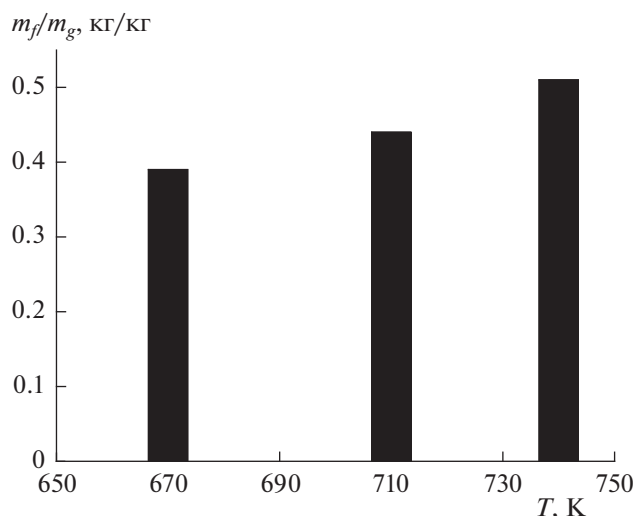


Рис. 4. Зависимость отношения массовых потоков продуктов газификации уротропина и азота, m_f/m_g , от начальной температуры фильтрующегося газа.

азота от начальной температуры фильтрующегося газа. Отношение величин потоков показывает, сколько продуктов газификации горючего приходится на единицу массы входящего азота. Рост температуры входящего азота от 670 до 740 К приводит к увеличению потока продуктов газификации уротропина с 0.39 до 0.51 кг на 1 кг азота. Изменение температуры входящего азота приводит к регулированию расхода продуктов газификации горючего, что позволяет контролировать тягово-экономические характеристики двигателя. Данный результат согласуется с выводами работы [39].

Анализ газообразных продуктов показал, что при температуре фильтрующегося азота 670 К содержание азота в газообразных продуктах газификации составляло 95–97 об.%. При этом в составе продуктов удалось определить только водород с содержанием в доли процентов. При температуре фильтрующегося азота 740 К его содержание в газообразных продуктах газификации варьировалось от 71 до 91 об.%, при этом среднее значение содержания азота составило 81 об.%. Содержание водорода в продуктах достигало 7 об.%. Также удалось определить содержание метана, составившее доли процентов. В работе [40] экспериментально исследовали пиролиз уротропина в условиях ламинарного диффузионного пламени. Было обнаружено, что начальный пиролиз уротропина происходит при сравнительно низкой температуре с образованием небольшого количества газообразных углеводородов, значительного количества водорода и твердых отложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально исследовалась газификация засыпки твердого сублимирующегося уротропина при фильтрации через него высокотемпературного потока азота. Показано, что с ростом начальной температуры фильтрующегося газа время газификации уротропина снижается, а интенсивность процесса газификации горючего увеличивается, что приводит к увеличению потока продуктов газификации уротропина. Рост температуры входящего азота от 670 до 740 К привел к увеличению массовой скорости газификации уротропина с 0.29 до 0.38 г/с, а также к увеличению потока продуктов газификации уротропина с 0.39 до 0.51 кг на 1 кг азота. Содержание водорода в газообразных продуктах достигало 7 об.%. Изменение температуры входящего потока азота позволяет регулировать расход продуктов газификации горючего, что, в свою очередь, дает возможность контролировать тягово-экономические характеристики двигателя.

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда № 21-79-20008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oserov A., Natan B., Gany A.* // Acta Astronaut. 1986. V. 39. № 8. P. 589.
2. *Yang S., He G.Q., Liu Y. et al.* // Mech. Eng. Mater. 2012. V. 152–154. P. 204.
3. *Hong M.* // Aerosp. Sci. Technol. 2012. V. 16. P. 56; <https://doi.org/10.1016/j.ast.2011.03.001>
4. *Srinivasan R., Raghunandan B.N.* // Exp. Therm Fluid Sci. 2012. V. 44. P. 323; <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.07.004>
5. *Karpov A.I., Lesthev A.Y., Lipanov A.M. et al.* // J. Less Prevent. Proc. Industr. 2013. V. 26. P. 338; <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.10.007>
6. *Krishnan S., Rajesh K.K.* // Intern. J. Energetic Mater. Chem. Propul. 2002. V. 5. № 1–6. P. 316; <https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChem-Prop.v5.i1-6.340>
7. *Кириллов В.В., Ваулин С.Д.* // Хим. физика и мезоскопия. 2014. Т. 16. № 1. С. 60.
8. *Kim A., Crampton G.* // Prog. Safety Sci. Technol. 2008. V. 7. P. 891.
9. *Калинин С.В., Шабунин А.И., Сарабьев В.И. и др.* // Вестн. технол. ун-та. 2017. Т. 20. № 2. С. 44.
10. *Шандаков В.А., Жарков А.С., Стрельников В.Н. и др.* // Физико-химические основы создания элементов снаряжения низкотемпературных газогенераторов различного назначения. М.: Физматлит, 2011.
11. *Аверьков И.С., Разносчиков В.В., Яновский Л.С.* // Изв. Рос. акад. ракетных и артиллерийских наук. 2018. Т. 104. № 4. С. 117.
12. *Кириллов В.В.* // Вестн. ЮУрГУ. Сер. “Машиностроение”. 2015. Т. 15. № 3. С. 5.
13. *Аврашков В.Н., Метёлкина Е.С., Мещеряков Д.В.* // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46. № 4. С. 36.

14. Селезнев Р.К. // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. 2014. Т. 15. № 3. С. 4.
15. Белобровина М.В., Сенюшкин Н.С. // Актуальные пробл. авиации и космонавтики. 2013. Т. 1. № 9. С. 47.
16. Salgansky E.A., Lutsenko N.A. // Aerosp. Sci. Technol. 2021. V. 109. 106420; <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106420>
17. Фролов С.М., Иванов В.С. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 4. С. 68; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21040075>
18. Карасев В.Н., Картовицкий Л.Л., Левин В.М. // Вестн. Моск. авиац. ин-та. 2009. Т. 16. № 5. С. 10.
19. Зангиев А.Э., Иванов В.С., Фролов С.М. // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 5. С. 62; <https://doi.org/10.7868/S0207401X13050130>
20. Коротких А.Г., Сорокин И.В., Селихова Е.А. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 7. С. 32; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20070080>
21. Лемперт Д.Б., Казаков А.И., Дорофеев Е.М. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 7. С. 17; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20070092>
22. Губайдуллина Р.Р., Сенюшкин Н.С. // Аэрокосмич. техника, высокие технологии и инновации. 2018. Т. 1. С. 94.
23. Белобровина М.В., Сенюшкин Н.С. // Актуальные пробл. авиации и космонавтики. 2014. Т. 1. № 10. С. 40.
24. Сахин В.В., Герлиман Е.М., Брыков Н.А. // Системный анализ и аналитика. 2018. Т. 6. № 1. С. 41.
25. Фролов С.М., Звезгинцев В.И., Иванов В.С. и др. // ДАН. 2017. Т. 474. № 1. С. 51; <https://doi.org/10.7868/S0869565217130114>
26. Внучков Д.А., Звезгинцев В.И., Наливайченко Д.Г. и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25. № 4. С. 629.
27. Арефьев К.Ю., Федотова К.В., Яновский Л.С. и др. // Изв. вузов. Машиностроение. 2017. Т. 682. № 1. С. 86.
28. Суржиков С.Т. // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. 2014. Т. 15. № 3. С. 2.
29. Богомолов Я.Э., Малинин В.И. // Аэрокосмич. техника, высокие технологии и инновации. 2019. Т. 2. С. 35.
30. Shplyuk A.N., Zvegintsev V.I., Frolov S.M. et al. // Intern. J. Hydrog. Energy. 2020. V. 45. № 15. P. 9098; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.099>
31. Shplyuk A.N., Zvegintsev V.I., Frolov S.M. et al. // J. Propuls. Power. 2021. V. 37. № 1. P. 20; <https://doi.org/10.2514/1.B37780>
32. Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Бетев А.С. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 29; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20120158>
33. Tereza A.M., Medvedev S.P., Smirnov V.N. // Acta Astronaut. 2020. V. 176. P. 653; <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.045>
34. Tereza A.M., Medvedev S.P., Smirnov V.N. // Acta Astronaut. 2021. V. 181. P. 612; <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.09.048>
35. Manelis G.B., Glazov S.V., Salgansky E.A. et al. // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 92. P. 744; <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.056>
36. Salgansky E.A., Zaichenko A.Yu., Podlesny D.N. et al. // Fuel. 2017. V. 210. P. 491; <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.103>
37. Амелин И.И., Салганский Е.А., Волкова Н.Н. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2011. № 6. С. 1125.
38. Кислов В.М., Салганский Е.А., Цветков М.В. и др. // ЖПХ. 2017. Т. 90. № 5. С. 579.
39. Кытманов И.В., Никитина И.Е. // Компл. пробл. развития науки, образования и экономики региона. 2015. Т. 6. № 1. С. 106.
40. Кокурин А.Д., Родыгин Л.Г. // Физика горения и взрыва. 1969. Т. 5. № 4. С. 563.