

Труды МАИ. 2023. № 132  
Trudy MAI, 2023, no. 132

Научная статья  
УДК 621.43.056  
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176846>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ ЗАКОКСОВАННЫХ ФОРСУНОК

Андрей Владимирович Бакланов<sup>1✉</sup>, Андрей Андреевич Василевич<sup>2</sup>,  
Роман Александрович Чечнев<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им.  
А.Н.Туполева-КАИ, Казань, Россия

<sup>1</sup>[andreybaklanov@bk.ru](mailto:andreybaklanov@bk.ru)✉

<sup>2</sup>[andreyvasilevich02@mail.ru](mailto:andreyvasilevich02@mail.ru)

<sup>3</sup>[zenger4416@mail.ru](mailto:zenger4416@mail.ru)

**Аннотация.** В настоящей статье изложены результаты работы по изучению влияния магнитных полей на степень очистки каналов форсунки от продуктов разложения топлива [1]. Представлена конструкция установки, на которой проводились исследования форсунок. По результатам работ выявлено, что при подаче ТС-1 в форсунки загрязненные продуктами разложения топлива при воздействии на них электромагнитных полей не наблюдается эффекта очистки каналов [3-5].

**Ключевые слова:** камера сгорания, эксперимент, форсунка, газотурбинный двигатель, коксоотложение, магнитные поля

*Для цитирования:* Бакланов А.В., Василевич А.А., Чечнев Р.А. Исследование влияния магнитных полей на степень очистки закоксованных форсунок // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176846>

Original article

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MAGNETIC FIELDS ON THE DEGREE OF CLEANING COKED NOZZLES

**Andrey V. Baklanov<sup>1✉</sup>, Andrey A. Vasilevich<sup>2</sup>, Roman A. Chechnev<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev-KAI,  
Kazan, Russia

<sup>1</sup>[andreybaklanov@bk.ru](mailto:andreybaklanov@bk.ru)✉

<sup>2</sup>[andreyvasilevich02@mail.ru](mailto:andreyvasilevich02@mail.ru)

<sup>3</sup>[zenger4416@mail.ru](mailto:zenger4416@mail.ru)

**Abstract.** Carbon deposition in the injectors fuel channels may occur in the gas turbine engine combustion chambers, which depends on both chemical and fraction content of the fuel. Operation of the combustion chamber with injectors subjected to carbon deposition leads to combustion processes changing in the flame tube, which in its turn may lead to the combustion chamber failure. Thus, technology development, which would allow performing the channels cleaning from the depositing products is up-to-date.

Up to date, diethylene glycol, sulphur trioxide and other solvents are being applied to remove hydrocarbons with strong inclination to carbonization. Ways for hydrocarbon

fuels stability enhancing are being employed as well. Hydraulic cleaning is considered to be the most advanced method.

The article adduces the results of the study on the magnetic fields impact on the degree of fuel injector channels cleaning off fuel decomposition products. It describes the fuel injector design and provides the scheme of installation employed for the injector studies. Bodes and parameters for conducting experiments are listed.

At the first stage, the initial flow characteristic of all four injectors was measured at fuel pressures range from 0 to 3 MPa by ten points. Then the injector flushing was performed by feeding electromagnet with AC ( $V = 28V$ ,  $I = 1.9 A$ ) for ten hours. The injector flow characteristic was measured after each hour of operating time.

**Keywords:** combustion chamber, experiment, nozzle, gas turbine engine, coke deposition, magnetic fields

**For citation:** Baklanov A.V., Vasilevich A.A., Chechnev R.A. Investigation of the influence of magnetic fields on the degree of cleaning coked nozzles. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176846>

## **Введение**

В процессе работы камер сгорания может произойти нагарообразование в топливных каналах форсунок, которое является продуктом разложения топлива. Нагарообразование зависит от химического и фракционного состава топлива [6-8].

Могут быть найдены оптимальные конструкция и режим работы двигателя, при которых эти явления могут не проявляться или будут сведены до минимума. В

настоящее время для удаления ароматических углеводородов (деароматизации), обладающих повышенной склонностью к нагарообразованию, используют процесс адсорбционной хроматографии на силикагеле, или селективную экстракцию с применением в качестве растворителей диэтиленгликоля, сернистого ангидрида и др. Имеются также различные пути повышения термической стабильности углеводородных топлив. Наиболее совершенным способом считается гидроочистка [9-11].

Следует понимать, что работа камеры сгорания с форсунками, имеющими нагарообразование в топливных каналах, приводит к изменению процессов горения в жаровой трубе, и к перераспределению температурного поля в зоне горения, что приводит к выходу из строя камеры сгорания. В связи с вышеизложенным разработка технологии, которая позволила бы выполнить очистку каналов форсунки от продуктов разложения топлива является актуальной [12-15].

### **Влияние магнитных полей на возможность очистки форсунок**

В данной работе проведено исследование по влиянию магнитных полей на возможность очистки форсунок, имеющих нагарообразование в топливных каналах.

Форсунка центробежного типа состоит из корпуса 1, распылителя 2, гайки 3, уплотнительных колец 4, дросселирующей шайбы 5, сетчатого фильтра 6. Корпус 1 снабжен лопаточным завихрителем 7 из восьми лопаток, к которым припаиваются конические втулки 8, что способствует перемешиванию распыленного топлива с воздухом (рис. 1).



Рис.1. Состав форсунки

Для определения расходных характеристик форсунок используется установка, состоящая из следующих элементов (рис.2):

- камера 1, предназначенная для испытаний форсунок;
- насосная станция 2, включающая в себя двигатель во взрывобезопасном исполнении и насос, служащий для додачи керосина под необходимым давлением;
- пульта управления с контрольно-измерительными приборами и регулирующей арматурой, служащий для регулирования параметров керосина на входе в форсунку [16-18].

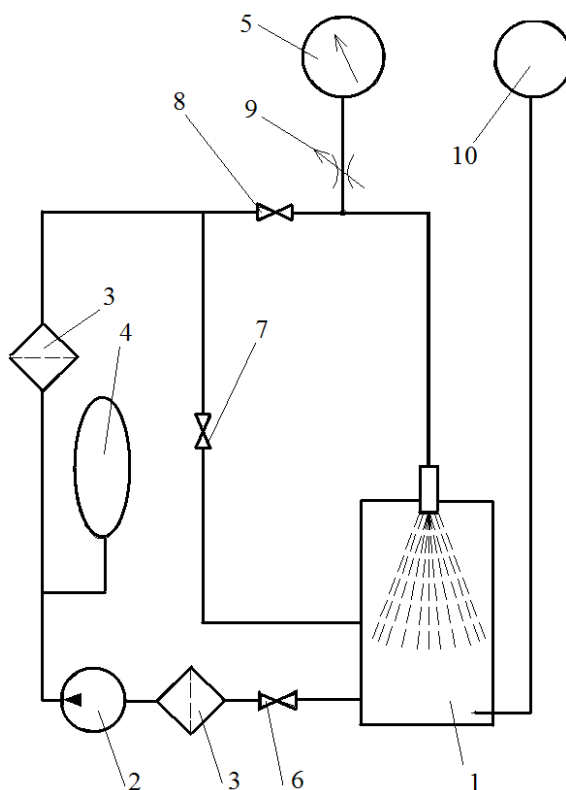


Рис. 2. Установка для проверки рабочих форсунок на угол и качество распыла:

1 – камера; 2 – насосная станция; 3 – фильтры; 4 – гидроаккумулятор; 5 – манометр;  
6, 7, 8 – вентили; 9 – дроссель; 10 – термометр дистанционный

### Методика проведения испытания

Испытываемая форсунка устанавливается в камере 1 (см. рис. 2). После открытия вентиля 8 включается насосная станция 2. Регулируя вентилем 7, устанавливается необходимое давление составляющее  $(3 \pm 0,02)$  МПа , а так же температура топлива  $20 \pm 5$  °С. Контроль величины давления производится по манометру 5, а температура при помощи термометра дистанционного 10. Для исключения поступления к распылителю загрязненного керосина, производится его очищение при помощи фильтра 3.

Для проведения работ по исследованию влияния магнитных полей на степень очистки форсунок установка (рис.2) модернизирована таким образом, чтобы обеспечить формирование магнитных полей. Для этого на установку смонтирован электромагнит. Для охлаждения электромагнита подведён сжатый воздух из воздушной магистрали. Для подачи на электромагнит постоянного тока применен источник постоянного тока Б5-21. Сила тока измеряется амперметром типа М2018, напряжение вольтметром, типа М330. Для подачи на электромагнит переменного тока применен понижающий трансформатор типа ТС-500 и ЛАТР типа ІМ. Силу тока измеряется амперметром типа Д506, напряжение вольтметром типа Д50151. Для проведения работ подобрано 4 форсунки, имеющие нагарообразование в топливных каналах. Расход топлива определялся через мерник с объемом  $V=0,495$  л. Давление топлива фиксировалось техническим манометром типа МТ-40-06. Температура топлива перед форсункой измерялась датчиком-термометром сопротивления ТСМ-6097, показания определялись по логометру ЛПр-53М [19-20]. На первом этапе снята исходная расходная характеристика всех четырех форсунок в диапазоне давлений топлива от 0 до 3 МПа по 10 точкам (см. таблицу 1).

Рт(МПа)	Расход топлива (л/мин)			
	№1	№2	№3	№4
0,3	0,22	0,20	0,11	0,15
0,6	0,31	0,25	0,16	0,23
0,9	0,39	0,31	0,29	0,30
1,2	0,45	0,36	0,25	0,35
1,5	0,51	0,40	0,28	0,40
1,6	0,56	0,45	0,31	0,45
2,1	0,60	0,48	0,34	0,50
2,4	0,65	0,52	0,38	0,54
2,7	0,69	0,56	0,44	0,57
3,0	0,73	0,61	0,54	0,60

Затем была выполнена прокачка форсунки при подаче переменного тока ( $V=28В$ ,  $J=1,9А$ ) к электромагниту в течении 10 часов. После каждого часа наработки, снималась расходная характеристика форсунки (см. таблицу 2).

Таблица 2

Рт (МПа) τ(час)	Расход топлива (л/мин)									
	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0
0	0,215	0,313	0,391	0,451	0,51	0,56	0,605	0,65	0,89	0,739
1	0,215	0,31	0,38	0,44	0,5	0,55	0,59	0,64	0,68	0,72
2	0,21	0,31	0,39	0,45	0,5	0,55	0,6	0,64	0,68	0,72
3	0,21	0,31	0,38	0,44	0,5	0,55	0,6	0,65	0,69	0,73
4	0,21	0,31	0,38	0,45	0,51	0,55	0,6	0,65	0,68	0,73
5	0,21	0,31	0,38	0,44	0,5	0,55	0,59	0,64	0,65	0,73
6	0,21	0,31	0,38	0,44	0,5	0,55	0,6	0,64	0,68	0,73
7	0,21	0,31	0,38	0,44	0,5	0,55	0,6	0,65	0,68	0,73
8	0,21	0,31	0,38	0,45	0,51	0,55	0,6	0,65	0,68	0,73
9	0,21	0,31	0,38	0,44	0,5	0,55	0,6	0,64	0,68	0,73
10	0,21	0,31	0,38	0,45	0,51	0,55	0,6	0,65	0,68	0,73



При прокачке форсунки к электромагниту подавался постоянный ток с силой тока от 1А до 10А. На каждом режиме работа выполнялась в течении одного часа и после чего, снималась расходная характеристика форсунки (см. таблицу 3).

Таблица 3

Р <sub>Т</sub> (МПа) J(сила тока)	Расход топлива (л/мин)						
	исх.	1А	2А	4А	6А	8А	10А
0,3	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
0,6	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
0,9	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
1,2	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
1,5	0,51	0,50	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
1,8	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
2,1	0,60	0,61	0,61	0,61	0,60	0,60	0,60
2,4	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
2,7	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
3,0	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73

Результаты прокачки форсунок имеющих нагарообразование в топливных каналах под воздействием электромагнитных полей показали, что расход форсунки за 20 часов прокачки не изменился.

### ***Выводы***

При прокачке форсунок, имеющих нагарообразование в топливных каналах, топливом ТС-1, воздействия на степень их очистки электромагнитными полями не выявлено.

## Список источников

1. Данильченко В.П., Лукачев С.В., Ковылов Ю.Л. и др. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 620 с.
2. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Результаты испытаний закоксованных форсунок камер сгорания семейства НК промывкой смесью керосина с техническим моющим средством. // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91839>
3. Метечко Л.Б., Тихонов А.И., Сорокин А.Е., Новиков С.В. Влияние экологических нормативов на развитие авиационного двигателестроения // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=67495>
4. Durbin M.D., Vangsness M.D., Ballal D.R., Katta V.R. Study of Flame Stability in a Step Swirl Combustor // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, vol. 118, no. 2, pp. 308-315. DOI: [10.1115/1.2816592](https://doi.org/10.1115/1.2816592)
5. Маркушин А.Н., Бакланов А.В., Салимзянова Г.Ф. Гидравлические потери в серийной и модернизированной многофорсуночной камере сгорания ГТД // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 18. № 1. С. 90-94.
6. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, 3rd ed., CRC Press, 2010, 537 pp.
7. Елисеев Ю.С., Крымор В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей. - М.: Высшая школа, 2002. – 355 с.

8. Тимофеев Н.И. Конструкция и летная эксплуатация двигателя НК-8-2У. - М.: Машиностроение, 1978. – 118 с.
9. Болховитин М.С., Боровиков Д.А., Ионов А.В., Селиверстов С.Д. Разработка испытательного стенда для малоразмерных газотурбинных двигателей // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75612>
10. Маркушин А.Н., Меркушин В.К., Бышин В.М. Бакланов А.В. Организация низкоэмиссионного горения в кольцевой камере сгорания ГТД // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2009. № 3. С. 50-53.
11. Бакланов А.В. Поэтапная доводка камеры сгорания газотурбинного двигателя, работающей в условиях форсирования скорости воздуха на выходе из компрессора // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 13-22.
12. Lefebvre А.Н. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1985, vol. 107, no. 1, pp. 24-37. DOI: [1115/1.3239693](https://doi.org/10.1115/1.3239693)
13. Lieuwen T.C., Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines // Progress in Astronautics and Aeronautics, 2005, vol. 210, pp. 657. DOI: [10.2514/4.866807](https://doi.org/10.2514/4.866807)
14. Kiewewetter F., Konle M., Sattelmayer T. Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flashback in a Premix Burner with Cylindrical Mixing Zone // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, vol. 129, no. 4, pp. 929–936. DOI: [10.1115/1.2747259](https://doi.org/10.1115/1.2747259)
15. Schluter J., Schonfeld T., Poinso T., Kreds W., Hoffmann S. Characterization of confined swirl flows using large eddy simulations. ASME Turbo Expo 2001. DOI: [10.1115/2001-GT-0060](https://doi.org/10.1115/2001-GT-0060)

16. Harrison W.E., Zabarnick S. The OSD Assured Fuels Initiative—Military Fuels Produced from Coal. Presented at DoE Clean Coal Conference, Clearwater, FL, June 2007.
17. Taylor S.C. Burning velocity and the influence of flame stretch. Ph.D. Thesis. University of Leeds, 1991, available at: <http://etheses.whiterose.ac.uk/2099/>
18. Durbin M.D., Vangsness M.D., Ballal D.R., Katta V.R. Study of Flame Stability in a Step Swirl Combustor // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, vol. 118, no. 2, pp. 308-315. DOI: [10.1115/1.2816592](https://doi.org/10.1115/1.2816592)
19. Gokulakrishnan P., Fuller C.C., Klassen M.S. et al. Experiments and modeling of propane combustion with vitiation // Combustion and Flame, 2014, vol. 161, no. 8, pp. 2038-2053. DOI: [10.1016/j.combustflame.2014.01.024](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.01.024)
20. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred Nick. Swirl Flows. Energy and engineering science series, Abacus Press, 1984, 475 p. DOI: [10.1016/0010-2180\(86\)90133-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90133-1)

## References

1. Danil'chenko V.P., Lukachev S.V., Kovylov Yu.L. et al. *Proektirovanie aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* (Design of aircraft gas turbine engines), Samara, Izd-vo SNTs RAN, 2008, 620 p.
2. Markushin A.N., Baklanov A.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91839>
3. Metechko L.B., Tikhonov A.I., Sorokin A.E., Novikov S.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67495>

4. Durbin M.D., Vangsness M.D., Ballal D.R., Katta V.R. Study of Flame Stability in a Step Swirl Combustor, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1996, vol. 118, no. 2, pp. 308-315. DOI: [10.1115/1.2816592](https://doi.org/10.1115/1.2816592)
5. Markushin A.N., Baklanov A.V., Salimzyanova G.F. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2013, vol. 18, no. 1, pp. 90-94.
6. Lefebvre A.H., Ballal D.R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*, 3rd ed., CRC Press, 2010, 537 pp.
7. Eliseev Yu.S., Krymor V.V., Malinovskii K.A., Popov V.G. *Tekhnologiya ekspluatatsii, diagnostiki i remonta gazoturbinykh dvigatelei* (Technology of operation, diagnostics and repair of gas turbine engines), Moscow, Vysshaya shkola, 2002, 355 p.
8. Timofeev N.I. *Konstruktsiya i letnaya ekspluatatsiya dvigatelya NK-8-2U*. (The design and operation of the engine NK-8-2U), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 118 p.
9. Bolkhovitin M.S., Borovikov D.A., Ionov A.V., Seliverstov S.D. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75612>
10. Markushin A.N., Merkushin V.K., Byshin V.M. Baklanov A.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2009, no. 3, pp. 50-53.
11. Baklanov A.V. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 13-22.
12. Lefebvre A.H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1985, vol. 107, no. 1, pp. 24-37. DOI: [1115/1.3239693](https://doi.org/10.1115/1.3239693)
13. Lieuwen T.C., Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 2005, vol. 210, pp. 657. DOI: [10.2514/4.866807](https://doi.org/10.2514/4.866807)

14. Kieseewetter F., Konle M., Sattelmayer T. Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flashback in a Premix Burner with Cylindrical Mixing Zone, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, vol. 129, no. 4, pp. 929–936. DOI: [10.1115/1.2747259](https://doi.org/10.1115/1.2747259)
15. Schluter J., Schonfeld T., Poinso T., Kreds W., Hoffmann S. *Characterization of confined swirl flows using large eddy simulations*. ASME Turbo Expo 2001. DOI: [10.1115/2001-GT-0060](https://doi.org/10.1115/2001-GT-0060)
16. Harrison W.E., Zabarnick S. *The OSD Assured Fuels Initiative–Military Fuels Produced from Coal*. Presented at DoE Clean Coal Conference, Clearwater, FL, June 2007.
17. Taylor S.C. *Burning velocity and the influence of flame stretch*. Ph.D. Thesis. University of Leeds, 1991, available at: <http://etheses.whiterose.ac.uk/2099/>
18. Durbin M.D., Vangsness M.D., Ballal D.R., Katta V.R. Study of Flame Stability in a Step Swirl Combustor, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1996, vol. 118, no. 2, pp. 308-315. DOI: [10.1115/1.2816592](https://doi.org/10.1115/1.2816592)
19. Gokulakrishnan P., Fuller C.C., Klassen M.S. et al. Experiments and modeling of propane combustion with vitiation, *Combustion and Flame*, 2014, vol. 161, no. 8, pp. 2038-2053. DOI: [10.1016/j.combustflame.2014.01.024](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.01.024)
20. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred Nick. *Swirl Flows*. Energy and engineering science series, Abacus Press, 1984, 475 p. DOI: [10.1016/0010-2180\(86\)90133-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90133-1)

Статья поступила в редакцию 09.09.2023

Одобрена после рецензирования 10.10.2023

Принята к публикации 27.10.2023

The article was submitted on 09.09.2023; approved after reviewing on 10.10.2023;  
accepted for publication on 27.10.2023