

УДК 621.438.056: 577.440

## РАЗРАБОТКА МАЛОЭМИССИОННОЙ ДВУХТОПЛИВНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

© 2014 А. В. Бубенцов, Д. К. Василюк, П. А. Голубев, Р. Е. Кириченко,  
В. А. Ташкинов, Б. В. Шошин

ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск

В статье представлен опыт ОАО «НПО «Сатурн» по созданию двухтопливной камеры сгорания двигателя Е70/8РД. Представлены данные модернизации камеры сгорания по технологии RQQ ( «богатое» горение – резкое разбавление – «бедное» горение), которая позволила значительно снизить выбросы  $\text{NO}_x$  при работе на природном газе и обеспечить требования технического задания на двигатель. Также рассматривается проблема обеспечения теплового состояния стенок жаровой трубы.

*Камера сгорания, форсунка, двухтопливность, сегментная конструкция, выбросы вредных веществ, тепловое состояние.*

Механизмы образования вредных веществ при сгорании углеводородных топлив в камерах сгорания ГТД широко представлены в научных и инженерных публикациях. Разработаны также технологии их снижения. Однако при решении практических задач по разработке и доводке низкоэмиссионных камер сгорания (КС), кроме задачи собственно снижения выбросов вредных веществ, требуется обеспечить:

- устойчивое горение и отсутствие регулярных пульсаций давления воздуха в КС;
- приемлемое тепловое состояние элементов конструкции КС;
- неравномерность температурного поля на выходе из КС;
- заданный уровень гидравлических потерь.

Решение этой комплексной задачи существенно ограничивает возможности конструктивных изменений КС.

В рамках программы создания перспективных морских ГТД, предназначенных для работы в составе гражданских морских объектов различного назначения (пассажирских и транспортных судов, буровых платформ, плавучих электростанций, плавучих и припортовых производств), в НПО «Сатурн» разработан дви-

гатель мощностью 8 МВт и ресурсом 100000 часов с двухтопливной КС (рис. 1, а). Особое требование предъявлено к конструкции КС – необходимость надёжной работы как на жидком, так и газообразном топливе, а также обеспечение перехода от одного вида топлива к другому без останова двигателя.

Согласно ТЗ ГТД должен быть экологически чистым и оказывать минимальное воздействие на окружающую воздушную среду. Содержание вредных выбросов в выхлопных газах ГТД (сухие продукты сгорания при 0°C и давлении 101,3 кПа, при условной концентрации кислорода 15 %) на номинальном режиме не должно превышать:

- концентрация оксидов азота  $\text{NO}_x^{15\%O_2}$  не более 200 мг/м<sup>3</sup>;
- концентрация окиси углерода  $\text{CO}^{15\%O_2}$  не более 300 мг/м<sup>3</sup>.

В связи со сжатыми сроками работа была разделена на два этапа:

- отработка технологии двухтопливной КС на базе серийного прототипа;
- разработка низкоэмиссионной двухтопливной КС.

В качестве прототипа использовалась КС двигателя Е70ФРУ. На её базе спроектирована КС (рис. 1, а) с кольцевой прямооточной жаровой трубой (рис. 1, в).

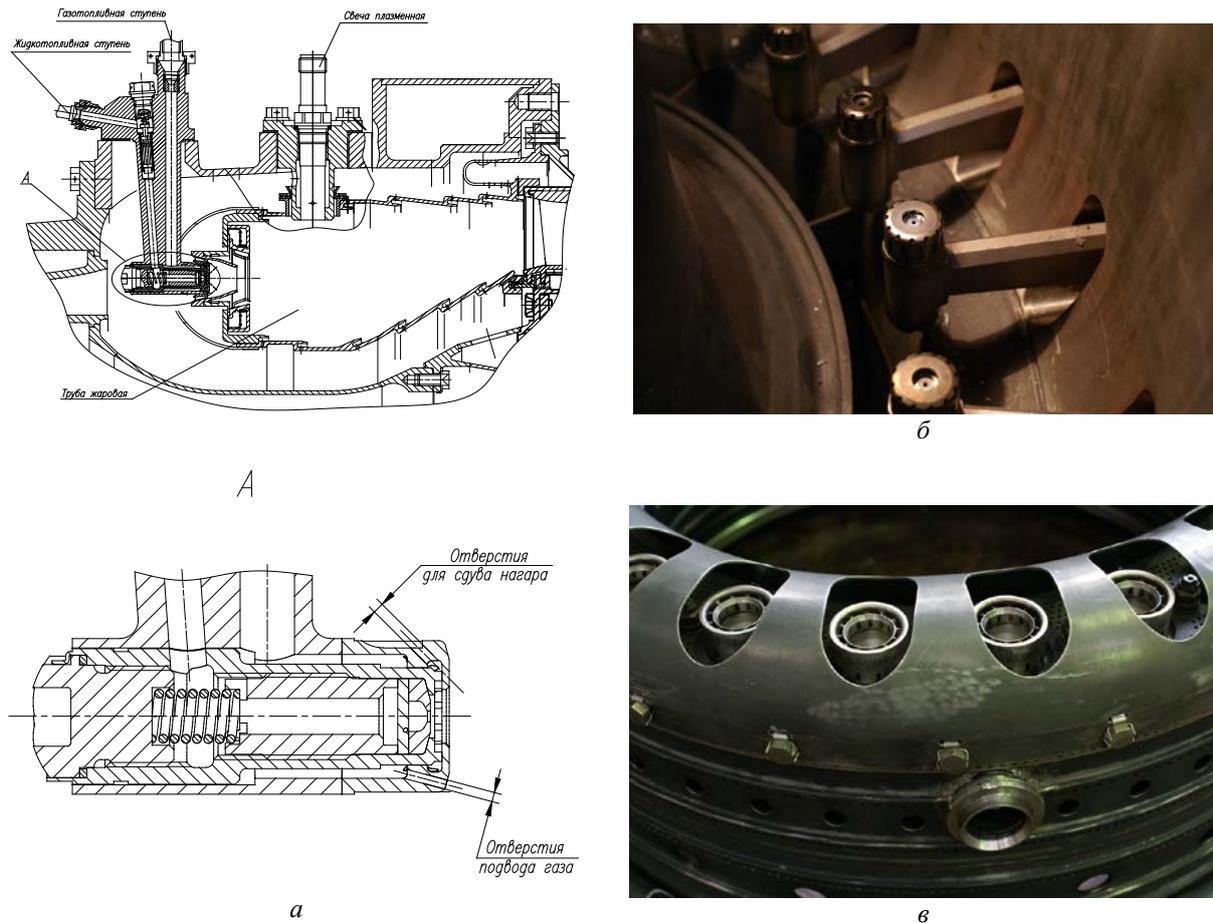


Рис. 1. Конструкция КС двигателя E70/8РД:  
 а – продольный разрез; б – топливные форсунки; в – жаровая труба

Фронтное устройство с завихрителями включает в себя 24 комбинированные газожидкостные форсунки (рис. 1, б). Центральная ступень предназначена для подачи жидкого топлива, периферийная – для подачи газового топлива.

В 2011 году выполнен полный цикл испытаний в составе газогенератора и двигателя, подтверждена работоспособность прототипа КС на газообразном и жидком топливе, выполнен переход от одного вида топлива к другому без останова двигателя.

Так как данный ГТД может размещаться в черте прибрежных городов и портах, для уменьшения негативного вли-

яния на окружающую среду необходимо снижение уровня выбросов вредных веществ (табл. 1) КС прототипа. С этой целью была спроектирована низкоэмиссионная КС по технологии богато-бедного горения (рис. 2, а, б).

Фронтное устройство спроектированной низкоэмиссионной КС включает в себя 72 горелки (рис. 2, в), что позволяет обеспечить более равномерное распределение топливо-воздушной смеси во всем объеме жаровой трубы. Для опытной отработки КС в составе газогенератора использовались два комплекта двухъярусных форсунок: газовые и жидкотопливные центробежные.

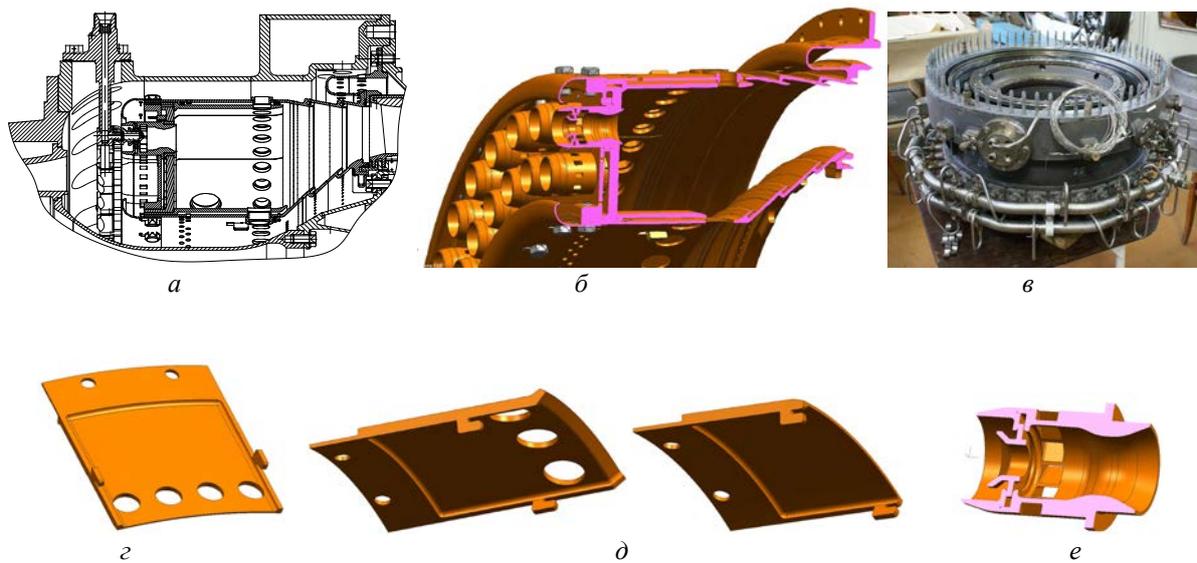


Рис. 2. Опытная КС:

*а – продольный разрез КС; б – 3D-представление жаровой трубы; в – КС в сборе; г – сегмент наружный; д – сегменты внутренние; е – горелка*

Первоначально отработка конструкции завихрителей выполнялась с использованием стериолитографических моделей. На основании «холодных» продувок выбраны и изготовлены опытные горелочные модули, проведены огневые испытания в составе открытого и многорелочного отсеков (рис. 3).

Одно из требований к данному двигателю – обеспечение перехода от жидкого к газовому топливу и обратно без перемонтажа форсунок. Для обеспечения данного требования разработана двухтоп-

ливная двухъярусная форсунка (рис. 4). После испытаний на газогенераторе с целью повышения качества смесеобразования, разделения зон подвода жидкого 1 и газового 2 топлива и снижения эмиссии выбросов  $\text{NO}_x$  на жидком топливе введён дополнительный 3й ярус завихрителя.

Изготовлены и испытаны в составе газогенератора и двигателя КС прототипа (рис. 1, а) и низкоэмиссионная КС (рис. 2, а). Получены следующие значения выбросов вредных веществ, приведённые в табл. 1 и на рис. 5.

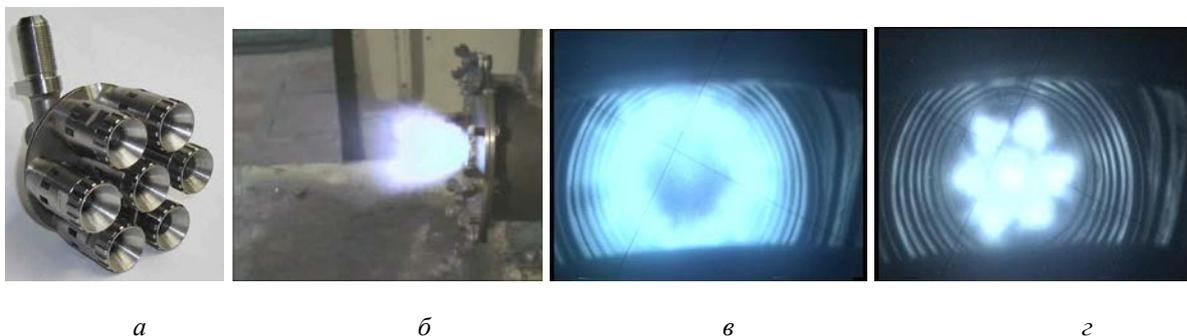


Рис. 3. Опытная конструкция горелочного модуля (а) и его огневые испытания: б – одной горелки на стенде НПО «Сатурн»; в – при  $P_k=3,3 \text{ ата}$ ,  $T_k=430 \text{ К}$ ,  $\alpha=5$ ; г – при  $P_k=3,3 \text{ ата}$ ,  $T_k=430 \text{ К}$ ,  $\alpha=14$  (граница срыва пламени)

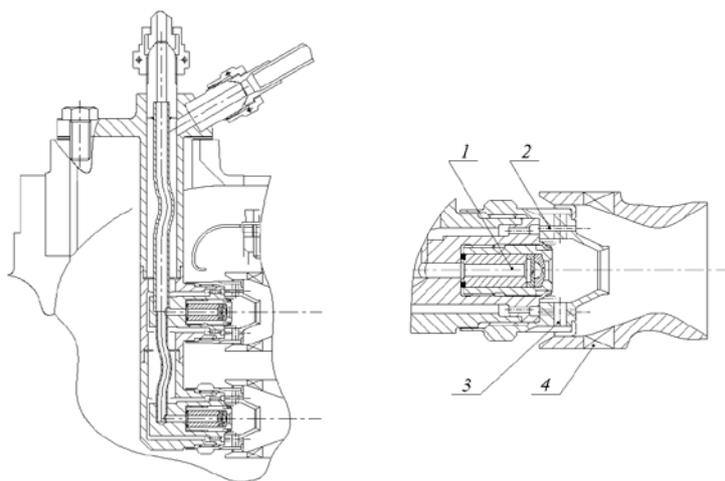


Рис. 4. Изменения конструкции горелки:

1 – канал подвода жидкого топлива; 2 – канал подвода газового топлива;  
3 – первый ярус завихрителя; 4 – второй ярус завихрителя

Таблица 1. Уровень выбросов вредных веществ при работе на жидком и газообразном топливах (в мг/м<sup>3</sup>)

| Уровень вредных выбросов | Жидкое топливо                   |                     | Газообразное топливо             |                     |
|--------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
|                          | NO <sub>x</sub> <sup>15%O2</sup> | CO <sup>15%O2</sup> | NO <sub>x</sub> <sup>15%O2</sup> | CO <sup>15%O2</sup> |
| Прототип                 | 378                              | 31                  | 215                              | 40                  |
| Низкоэмиссионная КС      | 337                              | 26                  | 108–124                          | 8–23                |

Высокие показатели выбросов вредных веществ при работе на дизельном топливе в составе низкоэмиссионной КС связаны с повышенной неравномерностью подачи топлива по коллекторам (порядка 26 %).

При применении технологии богатого горения в первичной зоне необходимо поддерживать постоянный коэффициент избытка воздуха порядка 0,5–0,6. Воздух, который идёт на охлаждение участка жаровой трубы, при попадании в первичную зону будет увеличивать коэффициент избытка воздуха, при этом произойдёт увеличение выбросов NO<sub>x</sub>. Для

снижения количества «паразитного» воздуха в первичной зоне и обеспечения теплового состояния применена сегментная конструкция стенок жаровой трубы с ударно-конвективной системой охлаждения. Кроме того, сегментная конструкция также повышает ремонтпригодность жаровой трубы при относительно невысоком увеличении её массы (порядка 19 %). Оптимизация теплового состояния сегментов при проектировании КС выполнялась на двух типах сегментов (рис. 2, з, д). Исследование смешения выполнялось с использованием различного вида основных отверстий подвода воздуха в зону горения.

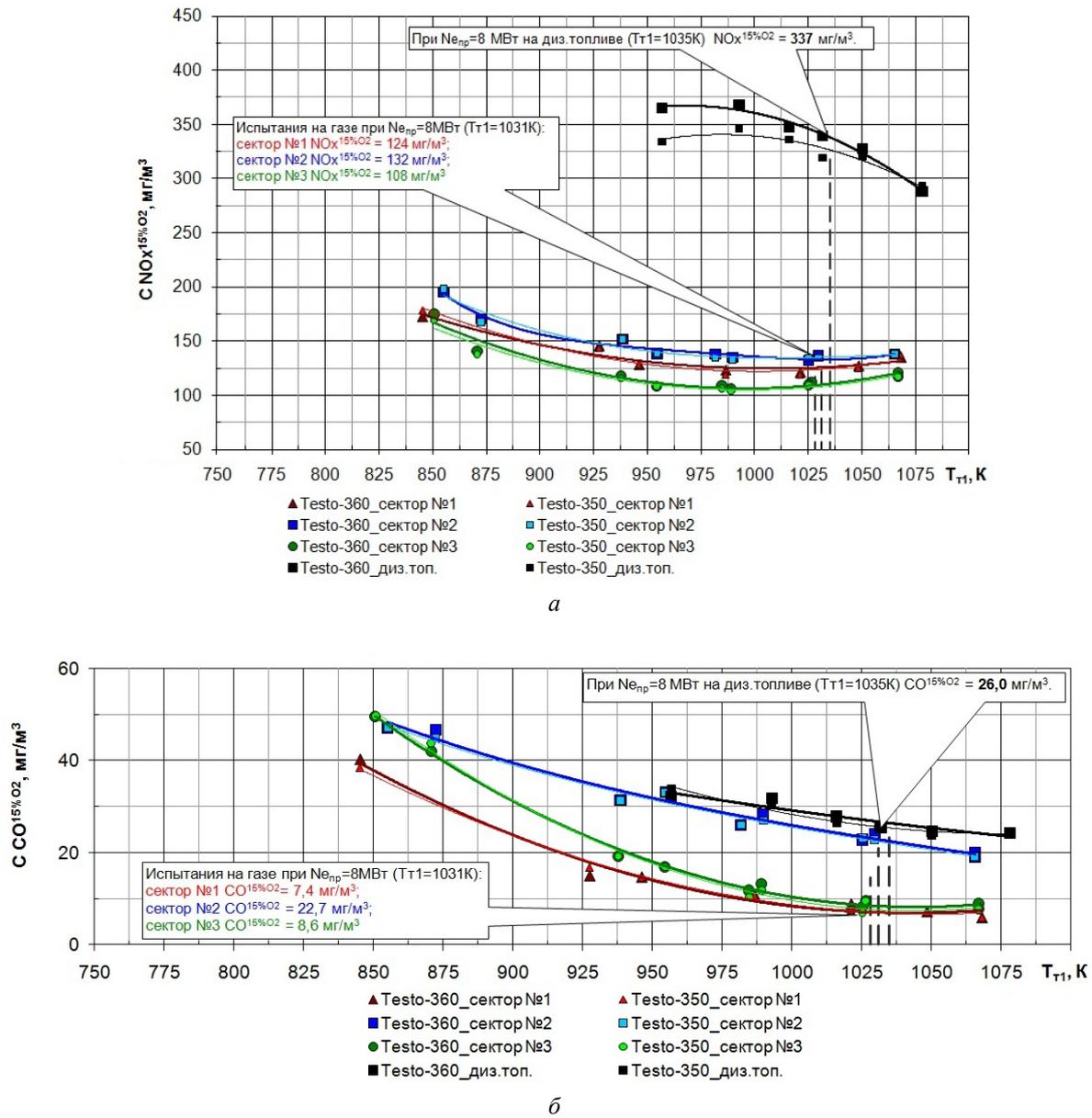


Рис. 5. Характеристики НЭКС при изменении температуры газа за турбиной:  
 а – по  $\text{NO}_x$ ; б – по  $\text{CO}$

Для оценки теплового состояния жаровой трубы были проведены испытания КС в составе опытного газогенератора (максимальная мощность 8,0 МВт). По результатам расшифровки термоиндикаторной краски, а также по данным термометрирования (рис. 6) получено:

- наружная стенка жаровой трубы имеет температуру в диапазоне от 505 °С до 888 °С;
- внутренняя стенка жаровой трубы имеет температуру в диапазоне от 583 °С до 888 °С;

- наружные сегменты имеют температуру в диапазоне от 753 °С до 1080 °С;
- внутренние сегменты имеют температуру в диапазоне от 753 °С до 1080 °С.

Полученные значения температуры не превышают допустимую величину для материала ХН50ВМТЮБ-ВИ (ЭП648-ВИ), но они выше значений, которые рекомендуются для длительной работы изделия (950 °С и ниже), в связи с этим необходима доработка системы охлаждения. При визуальном осмотре на внутрен-

них сегментах были выявлены зоны перегрева, а также деформация выходных кромок. Дефектов по тепловому состоянию стенок жаровой трубы не отмечено

за весь период испытаний в объеме 154 часов. Из них 146 часов работы на газообразном, 8 часов – на жидком топливе.

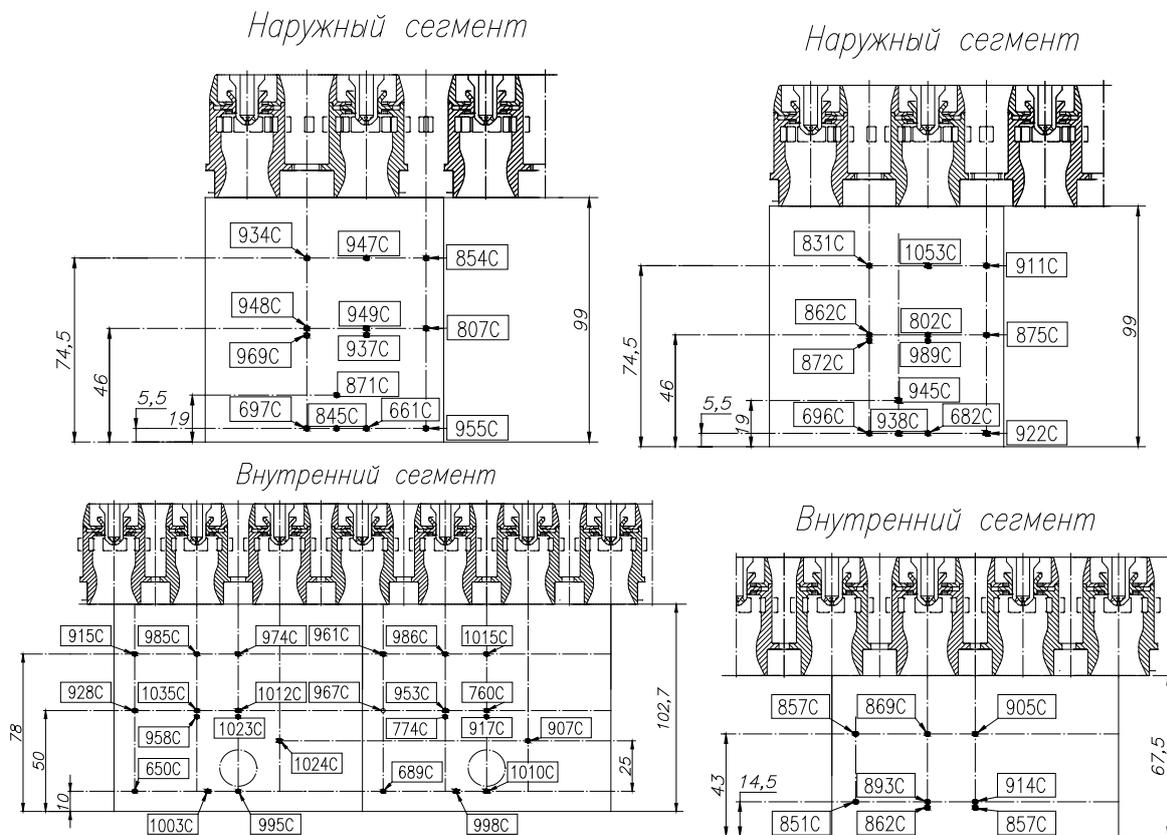


Рис. 6. Результаты термометрирования сегментов

В целях получения запасов по температуре сегментов жаровой трубы выполнена оптимизация системы охлаждения. Испытано два варианта:

1) Ударно-конвективное охлаждение – выполнено аналогично изображенному на рис. 2, а и 7, а, при этом первый ряд отверстий, подводящих воздух в канал между стенкой жаровой трубы и сегментом, смещён в наиболее горячую зону (рис. 7, б).

2) Ударно-конвективное пленочное охлаждение с выдувом охлаждающего воздуха через отверстия в сегменте (рис. 7, в).

По результатам термометрирования получено:

– максимальная температура наружного сегмента с ударно-конвективным охлаждением (вариант 1)

находится по показаниям: термокраски в диапазоне  $T_w = 753 - 888$  °С; датчиков ИМТК – 794 °С; термопар – 762°С;

– максимальная температура внутреннего сегмента с ударно-конвективным охлаждением (вариант 1) находится по показаниям указанных выше датчиков:  $T_w = 681 - 753$  °С; 749 °С; 738°С;

– максимальная температура наружного сегмента с ударно-конвективно-плёночным охлаждением (вариант 2) находится по показаниям указанных выше датчиков:  $T_w = 658 - 683$  °С; 688 °С; 676°С;

– максимальная температура внутреннего сегмента с ударно-конвективно-плёночным охлаждением (вариант 2) находится по показаниям указанных выше датчиков:  $T_w = 658 - 683$  °С; 670 °С; 661°С.

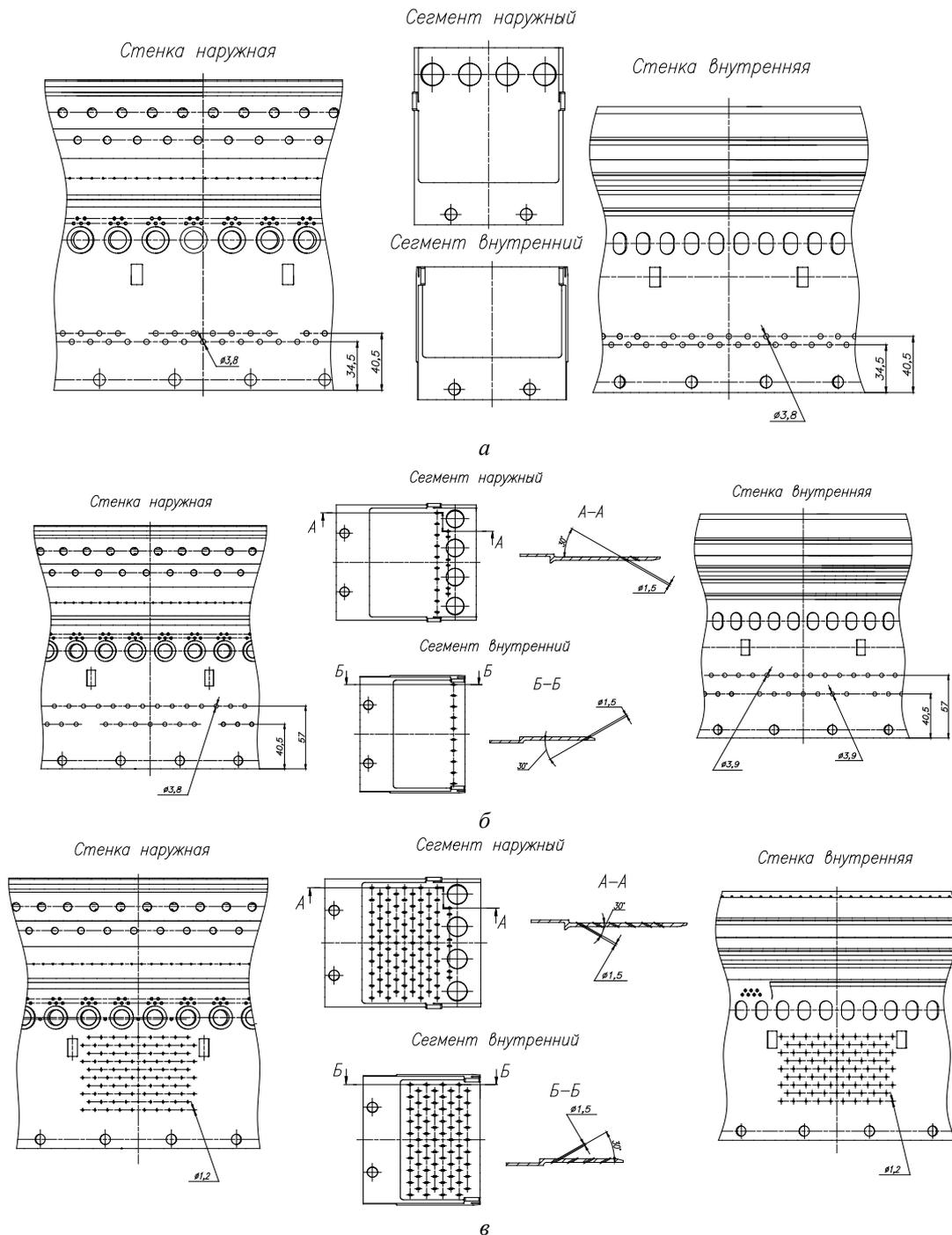


Рис. 7. Доработки системы охлаждения:

а – исходный вариант; б – вариант со смещённым рядом отверстий;  
в – вариант с ударно конвективным охлаждением и перфорированным сегментом

Для обеих систем охлаждения получены величины температуры, не превышающие допустимую для материала ХН50ВМТЮБ-ВИ (ЭП648-ВИ). При этом максимальные температуры сегментов позволяют говорить, что оба типа охлаждения приемлемы в данной конструкции и обеспечивают длительную работу сегментов.

В продолжении работ по оптимизации охлаждения сегментов для дополнительного теплосъёма, а также предотвращения деформации сегментов и обеспечения гарантированного зазора между стенкой и сегментом в конструкцию введены рёбра-ограничители (рис. 8).

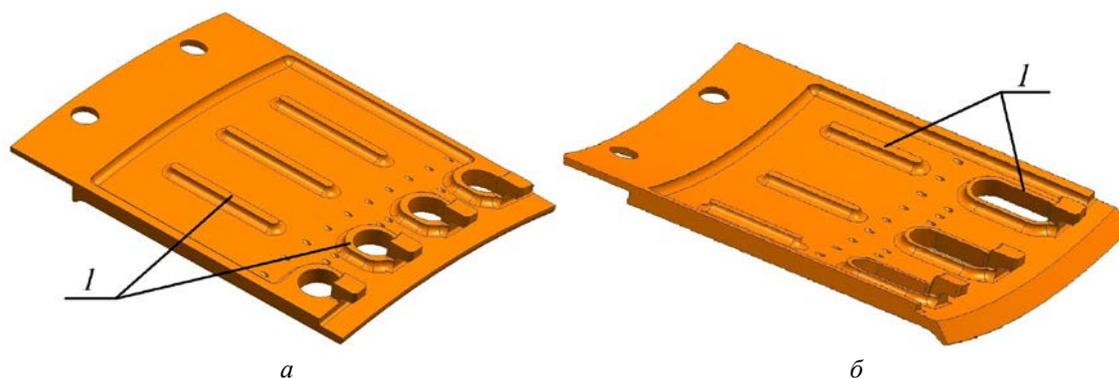


Рис. 8. Изменения конструкции:  
 а – наружный сегмент; б – внутренний сегмент; 1 – рёбра-ограничители

### Выводы

1. Разработана и испытана КС, обеспечившая работоспособность двигателя на жидком и газообразном топливах. Проект двигателя Е70/8РД принят государственной комиссией в сентябре 2011 г.

2. Выбросы вредных веществ разработанной КС составили:  $\text{NO}_x^{15\%O_2}$  от 108 до 124 в  $\text{мг/м}^3$ ,  $\text{CO}^{15\%O_2}$  от 8 до 23  $\text{мг/м}^3$ .

3. Разработана и оптимизирована сегментная конструкция жаровой трубы, обеспечившая температуру её элементов не более 700 °С.

### Информация об авторах

**Бубенцов Алексей Витальевич**, инженер-конструктор конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

**Василюк Дмитрий Константинович**, начальник расчётно-экспериментальной бригады конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

**Голубев Павел Александрович**, инженер-конструктор конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

**Кириченко Роман Евгеньевич**, начальник конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». E-mail: [roman.kirichenko@npo-saturn.ru](mailto:roman.kirichenko@npo-saturn.ru). Область научных интересов: камера сгорания ГТД, проектирование, расчёт и эксперимент.

**Ташкинов Валерий Александрович**, начальник конструкторско-расчётной бригады отдела камер сгорания, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

**Шошин Борис Васильевич**, инженер-конструктор конструкторского отдела камер сгорания и выходных устройств, ОАО «НПО «Сатурн». Область научных интересов: камера сгорания ГТД, расчёт и эксперимент.

**DEVELOPMENT OF A LOW-EMISSION BIFUEL COMBUSTION CHAMBER**

© 2014 A. V. Bubentsov, D. K. Vasiluk, P. A. Golubev,  
R. E. Kirichenko, V. A. Tashkinov, V. B. Shoshin

Science-and-Production Association SATURN, Rybinsk, Russian Federation

The paper presents the experience gained by the “Saturn” science-and-production association in producing a bifuel combustion chamber for the E70/8RD engine. The data on the modernization of the combustion chamber based on the RQQL (rich /quick quench/poor combustion) technology that made it possible to reduce significantly the emissions of NO<sub>x</sub> while working on natural gas and to meet the requirements of the technical project of the engine are presented. The problem of providing the thermal state of the flame tube walls is also discussed.

*Combustor, burner, two fuels, segmented structure, emission of harmful substances, thermal state*

**About the authors**

**Bubentsov Aleksey Vitalyevich**, design engineer, Science-and-Production Association SATURN. Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.

**Vasilyuk Dmitry Konstantinovich**, Calculation and Experimental Team Leader, Design Office of Combustion Chambers and Exhaust Systems, Science-and-Production Association SATURN. Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.

**Golubev Pavel Alexandrovich**, design engineer, Science-and-Production Association SATURN. Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.

**Kirichenko Roman Yevgenyevich**, Chief of the Design Office of Combustion Chambers and Exhaust Systems, Science-and-Production Association SATURN. E-mail: [roman.kirichenko@npo-saturn.ru](mailto:roman.kirichenko@npo-saturn.ru). Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, design, calculation and experiment.

**Tashkinov Valeri Alexandrovich**, Design and Experimental Team Leader, Science-and-Production Association SATURN. Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.

**Shoshin Boris Yevgenyevich**, design engineer, Science-and-Production Association SATURN. Area of Research: gas turbine engine combustion chambers, calculation and experiment.