

УДК 621.438

**С. И. СЕРБИН**, д-р техн. наук, проф.; директор Машиностроительного института Национального университета кораблестроения, Николаев;  
**А. Б. МОСТИПАНЕНКО**, канд. техн. наук, доц.; доц. Национального университета кораблестроения, Николаев;  
**А. В. КОЗЛОВСКИЙ**, аспирант Национального университета кораблестроения, Николаев;  
**В. Г. ВАНЦОВСКИЙ**, нач. отд. камер сгорания ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев;  
**В. В. ВИЛКУЛ**, нач. сектора расчетных и экспериментальных работ отдела камер сгорания ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев

### **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК НЕСТАЦИОНАРНОГО РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В НИЗКОЭМИССИОННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД**

Статья посвящена вопросам численного моделирования термо-акустических процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей. Проведен анализ пульсационных процессов в низкоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя, вызванных особенностями конструкции жаровых труб и аэродинамического взаимодействия компрессора, камеры сгорания и турбин, с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики (*CFD*). Проведен численный эксперимент по определению уровня пульсаций давления в камере сгорания газотурбинного двигателя.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, камера сгорания, турбулентное горение, пульсационное горение, численные методы, математическое моделирование

#### **Введение**

При создании низкоэмиссионных камер сгорания (КС) газотурбинных установок возникают трудности, связанные с неустойчивостью и пульсационным горением, акустическими колебаниями и срывными явлениями в проточной части двигателя, воздействующими на процессы горения [1]. Поэтому обеспечение устойчивости процесса горения является серьезной и актуальной задачей, требующей больших материальных затрат и занимает значительную часть времени при доводочных испытаниях двигателей. Использование численного эксперимента для прогнозирования режимов вибрационного горения позволит значительно сократить эти расходы [2]. Численный эксперимент дает возможность прогнозировать такие колебания путем моделирования трехмерных химически реагирующих турбулентных потоков и основную роль при этом играет выбор подхода к моделированию турбулентности [3].

#### **Анализ основных достижений и литературы**

Основная причина возникновения вибрационного горения – чувствительность смеси-, вихреобразования и горения к колебаниям давления газа в камере сгорания, сопровождающихся резким увеличением шума, срывами пламени, разрушением камеры, выходом из строя отдельных узлов и агрегатов ГТУ. Вибрационное горение недопустимо, так как приводит к разрушению элементов конструкции камеры сгорания [1].

#### **Цель исследования, постановка задачи**

Определение вибрационных характеристик низкоэмиссионной камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 25 МВт путем трехмерного анализа процессов нестационарного горения.

---

© С.И. Сербин, А.Б. Мостипаненко, А.В. Козловский, В.Г. Ванцовский, В.В. Вилкул, 2014

**Матеріали дослідження**

**Моделирование методом крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES).**

Основой этого метода является гипотеза о независимости статистических характеристик крупномасштабных турбулентных движений от молекулярной вязкости. Согласно этому предположению возможно построение численной модели, описывающей нестационарную динамику только в отношении крупных вихрей, при этом вычислительные затраты, необходимые для реализации такой модели, не должны зависеть от числа Рейнольдса, так как нет необходимости явно и точно рассчитывать все мелкие вихри [4]. Эту модель предполагается использовать для дальнейших расчетов камеры сгорания.

Турбулентные потоки характеризуются наличием вихрей, масштаб и время существования которых изменяются в очень широком диапазоне. Размеры наиболее крупные вихрей сравнимы с характерным геометрическим размером течения.

Причиной мелкомасштабных вихрей является рассеяние турбулентной кинетической энергии [5, 6]. Для исследований использовалась *WALE*-модификация модели турбулентности крупных вихрей.

**WALE-модель.** В данной модели [6, 7] турбулентная вязкость определяется по формуле

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\overline{S_{ij} S_{ij}})^{5/2} + (\overline{S_{ij} S_{ij}})^{5/4}},$$

где величины  $L_s$  и  $S_{ij}^d$  рассчитываются таким образом:

$$L_s = \min(kd, C_w V^{1/3}), \quad S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left( \overline{g_{ij}^2} + \overline{g_{ji}^2} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{g_{kk}^2}, \quad \overline{g_{ij}} = \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}, \quad \overline{g_{ij}} = \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}.$$

**Результаты исследования.** Нестационарные расчеты проводились с использованием *LES*-модели турбулентности [7]. Для промежуточных сечений и твердых стенок отслеживались пульсации статического давления, которые являются источниками акустических колебаний, и могут быть замерены при проведении экспериментов. Расчеты проводились для номинального режима работы ГТД.

В работе исследованы три варианта камеры сгорания, в которых использовались форсунки с различным количеством отверстий для истечения топлива: 1 – форсунка с 10 отверстиями диаметром 1,85 мм (рис. 1а); 2 – форсунка с 5 отверстиями диаметром 2,6 мм (рис. 1б); 3 – форсунка с 18 отверстиями диаметром 1,5 мм и одним отверстием диаметром 1 мм (рис. 1в).

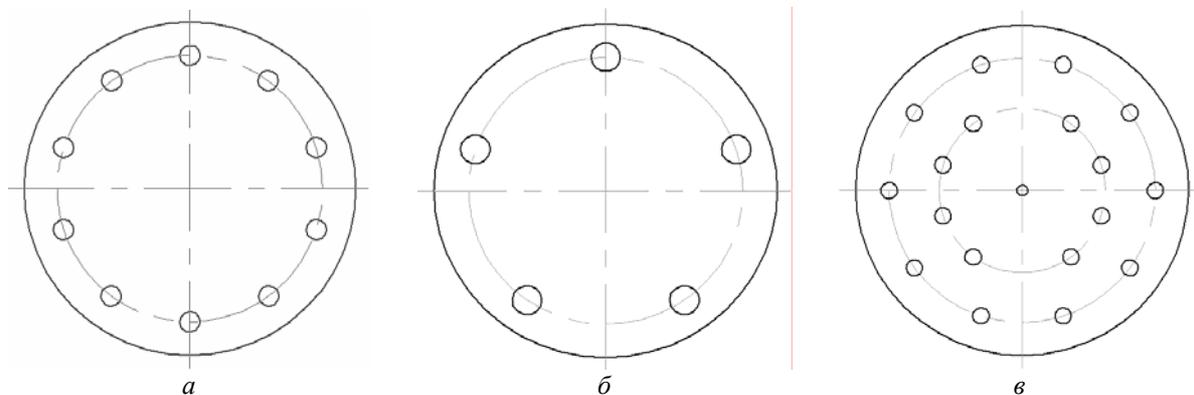
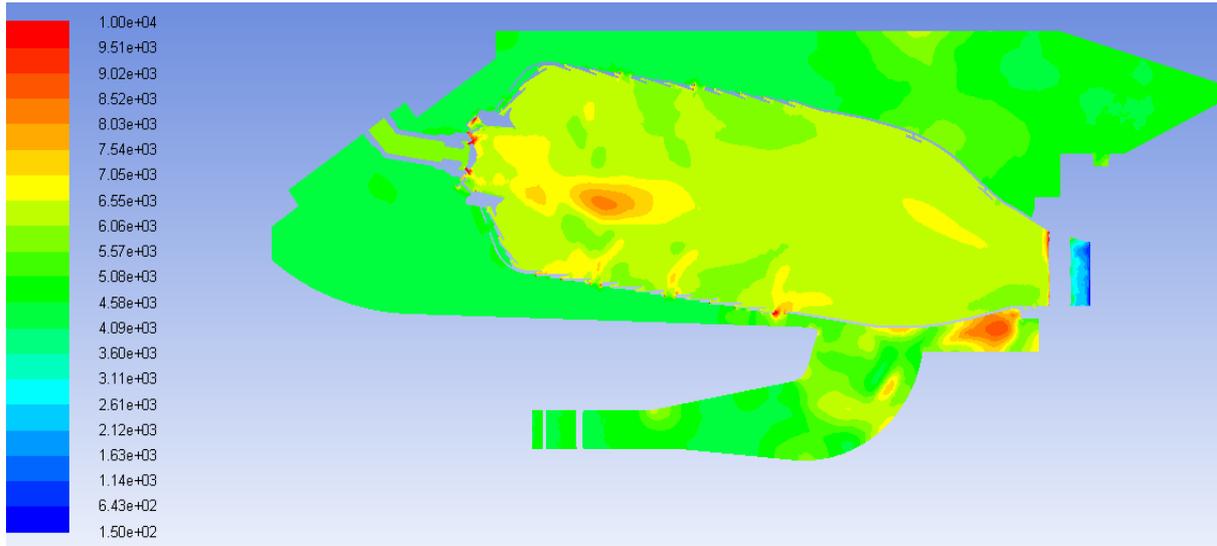
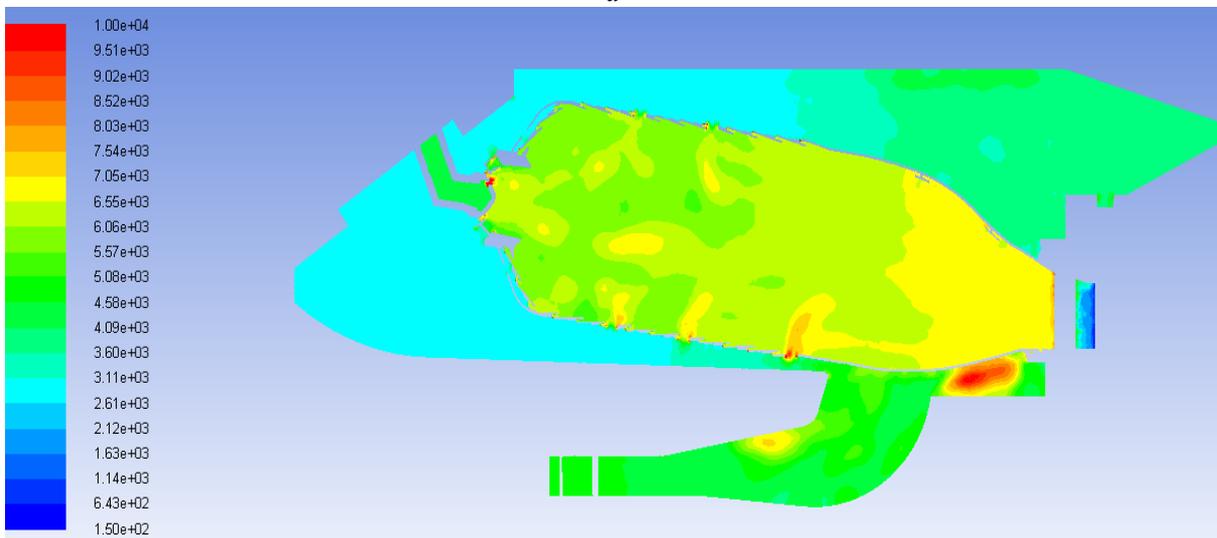


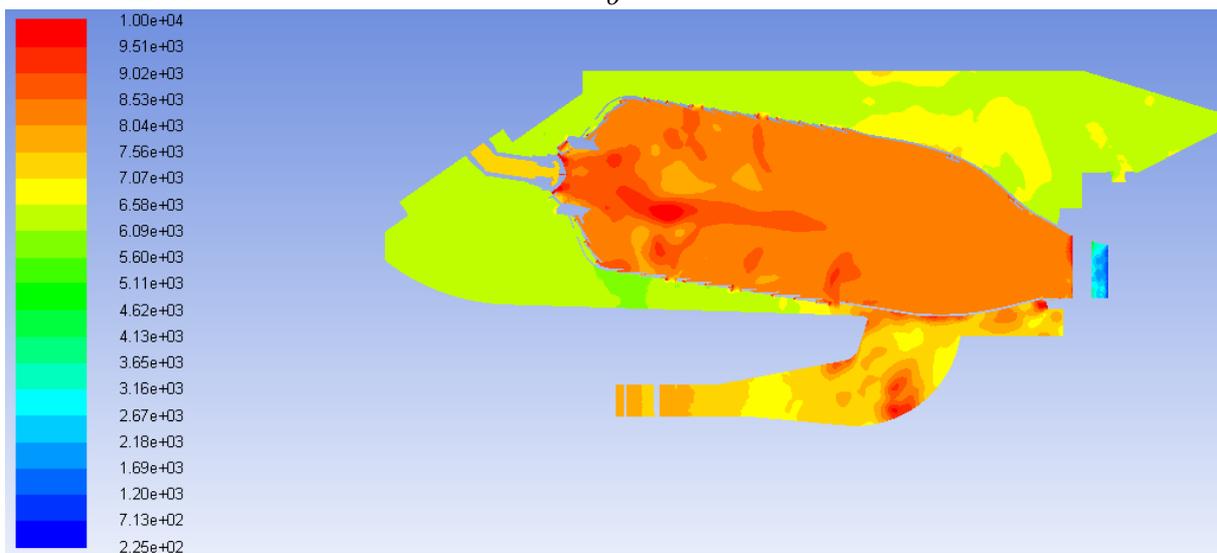
Рис. 1 – Варианты форсунок, использованных в численном эксперименте



*a*



*б*



*в*

Рис. 2 – Уровень среднеквадратических пульсаций статического давления в жаровой трубе:  
*a* – форсунка с 10 отверстиями; *б* – форсунка с 5 отверстиями; *в* – форсунка с 19 отверстиями

Зоны проявления максимальных пульсаций давления и скорости в объеме камеры сгорания в целом аналогичны зонам, определенным при стационарных расчетах камеры сгорания. Они находятся внутри жаровой трубы в районе отверстий вторичного воздуха (рис. 2), выхода из завихрителя в районе 3–5-й обечаек и во входном диффузоре подвода воздуха из компрессора. Также пульсации статического давления видны в районе отверстий подвода газообразного топлива (метана) в каналы завихрителя и при ударе продуктов сгорания о турбинные лопатки в выходном сечении жаровой трубы.

По данным контрольных экспериментальных испытаний пульсационного состояния двигателя мощностью 25 МВт с различным исполнением форсунок уровни динамического давления в камере сгорания на номинальном режиме работы ГТД с использованием форсунки с 10 отверстиями диаметром 1,85 мм (рис. 1а) не превышают допустимый уровень 5,4 кПа (рис. 3а). Согласно результатам проведенного численного эксперимента среднеквадратический уровень пульсаций давления для данного варианта форсунки в межтрубном пространстве над отверстиями вторичного воздуха составляет 5,2 кПа (рис. 2а).

Экспериментально замеренные уровни динамического давления на всех режимах работы ГТД с использованием форсунки с 5 отверстиями диаметром 2,6 мм (рис. 1б) не превышают допустимый уровень 4 кПа (рис. 3б). Согласно результатам проведенного численного эксперимента среднеквадратический уровень пульсаций давления для данного варианта форсунки в межтрубном пространстве над отверстием вторичного воздуха составляет 3,6 кПа (рис. 2б).

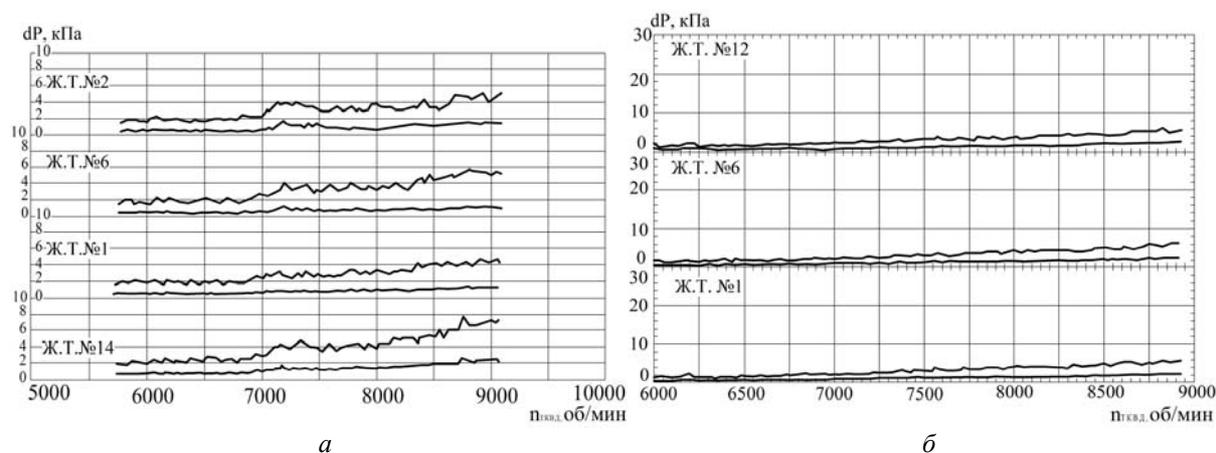


Рис. 3 – Уровни пульсации давления в КС при наборе мощности от холостого хода до номинальной нагрузки: а – форсунка с 10 отверстиями; б – форсунка с 5 отверстиями

### Выводы

1) Уровни динамического давления в камере сгорания на номинальном режиме работы ГТД по результатам численного эксперимента подтверждаются значениями, полученными при проведении стендовых испытаний. Вариант с форсункой с 18 отверстиями диаметром 1,5 мм и одним отверстием диаметром 1 мм показывает максимальные уровни динамического давления в камере сгорания, вследствие этого использование этого варианта форсунки не целесообразно. Вариант с форсункой с 5 отверстиями диаметром 2,6 мм обеспечивает минимальные уровни динамического давления в камере сгорания, следовательно, его можно рекомендовать для дальнейшей опытной и промышленной эксплуатации.

2) Время пребывания смеси в зоне горения зависит от скорости истечения топлива из форсунок. Так как при использовании топливораспыливающего устройства с 5 отверстиями диаметром 2,6 мм скорость истечения топлива из канала форсунок имеет наименьшее значение из трех исследуемых вариантов, то время пребывания смеси будет наибольшим, следовательно, при использовании данного варианта имеет место более эффективная стабилизация фронта пламени.

3) Результаты проведенных численных экспериментов с использованием трехмерных математических моделей в камерах сгорания, работающих на газообразном топливе, адекватно отражают физико-химические процессы нестационарного горения и могут быть рекомендованы для оптимизации геометрических и режимных параметров низкоэмиссионных камер сгорания.

4) Применение подобных математических моделей целесообразно как при создании новых образцов камер сгорания, работающих на обедненной топливо-воздушной смеси, так и при модернизации существующих камер с целью разработки конструктивных мероприятий, направленных на уменьшение вероятности возникновения режимов пульсационного горения.

**Список литературы:** 1. *Сербін, С. І.* Дослідження процесів нестационарного горіння в камері згорання ГТД [Текст] / С. І. Сербін, Г. Б. Мостіпаненко, А. В. Козловський // *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»*: Зб. наук. праць. – Х.: Мадрид, 2012. – № 8. – С. 11–16. – ISSN 2078-774X. 2. *Сербін, С. І.* Числове моделювання процесів горіння в експериментальному відсіку гібридної камери згорання ГТД потужністю 25 МВт [Текст] / С. І. Сербін, Г. Б. Мостіпаненко // *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»*: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2006. – № 5. – С. 59–66. 3. Arc modeling in a plasmatron channel [Text] / I. Matveev, A. Tropina, S. Serbin, V. Kostyuk // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2008. – Vol. 36, No. 1. – P. 293–298. 4. *Matveev, I. B.* Theoretical and Experimental Investigations of the Plasma-Assisted Combustion and Reformation System [Text] / I. B. Matveev, S. I. Serbin // *IEEE Transactions on Plasma Science.* – 2010. – Vol. 38. – Issue 12. – P. 3306–3312. 5. Plasma Fuel Nozzle as a Prospective Way to Plasma-Assisted Combustion [Text] / I. B. Matveev, S. A. Matveeva, E. Y. Kirchuk, S. I. Serbin, V. G. Bazarov // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2010. – Vol. 38, No. 12. – P. 3313–3318. 6. *Serbin, S. I.* Theoretical Investigations of the Working Processes in a Plasma Coal Gasification System [Text] / S. I. Serbin, I. B. Matveev // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2010. – Vol. 38, No. 12. – P. 3300–3305. 7. *Serbin, S. I.* Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection [Text] / S. I. Serbin, A. B. Mostipanencko, I. B. Matveev // *Proceedings of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference.* – Honolulu, Hawaii, USA. – 2011. – AJTEC2011-44042. – P. 6–11.

**Bibliography (transliterated):** 1. Serbin, S. I., G. B. Mostipanencko and A. V. Kozlovsk'kyj. "Doslidzhennja procesiv nestacionarnogo gorinnja v kameri zgorjannja GTD." *Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannja. Visnyk NTU "HPI"*. No. 6. Kharkiv: NTU "HPI", 2012. 11–16. ISSN 2078-774X. Print. 2. Serbin, S. I., and G. B. Mostipanencko "Chyslove modeljuvannja procesiv gorinnja v eksperymental'nomu vidsiku gibrydnoi' kamery zgorjannja GTD potuzhnistju 25 MVt." *Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannja. Visnyk NTU "HPI"*. No. 5. Kharkiv: NTU «HPI», 2006. 59–66. Print. 3. Matveev I., et al. "Arc modeling in a plasmatron channel." *IEEE Trans. Plasma Sci.* 36.1 (2008): 293–298. 4. Matveev, I. B., and S. I. Serbin. "Theoretical and Experimental Investigations of the Plasma-Assisted Combustion and Reformation System." *IEEE Transactions on Plasma Science* 38.12 (2010): 3306–3312. Print. 5. Matveev, I. B., et al. "Plasma Fuel Nozzle as a Prospective Way to Plasma-Assisted Combustion." *IEEE Trans. Plasma Sci.* 38.12 (2010): 3313–3318. 6. Serbin, S. I., and I. B. Matveev. "Theoretical Investigations of the Working Processes in a Plasma Coal Gasification System." *IEEE Trans. Plasma Sci.* 38.12 (2010): 3300–3305. Print. 7. Serbin, S. I., A. B. Mostipanencko and I. B. Matveev. "Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection." *Proceedings of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference.* No. AJTEC2011-44042. Honolulu, Hawaii, USA, 2011. 6-11. Print.

*Поступила (received) 18.02.2014*