

УДК 621.438

Козловский А.В.

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев, Украина

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕРМО-АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОЭМИССИОННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД МЕТОДОМ ТРЕХМЕРНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Kozlovskiy A.

Adm. Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, Ukraine. ([artem.kozlovskiy@nuos.edu.ua](mailto:artem.kozlovskiy@nuos.edu.ua))

### PREDICTION BY THREE-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODELING OF THE GAS TURBINE LOW-EMISSION COMBUSTION CHAMBERS THERMO-ACOUSTIC CHARACTERISTICS

*Рассмотрены вопросы численного моделирования термо-акустических процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей. Проведен анализ пульсационных процессов в низкоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики. Представлены результаты моделирования процессов нестационарного горения в низкоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя. По результатам трехмерных расчетов определены максимальные по амплитуде пульсации, возникающие в жаровой трубе и межтрубном пространстве камеры сгорания газотурбинного двигателя.*

*Ключевые слова:* газотурбинный двигатель; камера сгорания; пульсационное горение; численные методы; математическое моделирование.

#### Введение

Успешное применение газотурбинных двигателей в авиации и стационарной энергетике позволило создать различные типы корабельных газотурбинных установок. Они широко используются в качестве главных двигателей и приводов основных, вспомогательных и аварийных агрегатов на судах и кораблях различных типов, как за рубежом, так и в Украине [1]. Положительные качества, присущие газотурбинным установкам - хорошие массогабаритные показатели, высокая маневренность, простота управления и обслуживания, достаточная экономичность и надежность - дают им возможность выгодно конкурировать с паротурбинными и дизельными энергетическими установками [2].

Повышение топливной экономичности и энергетической эффективности газотурбинных двигателей за счёт увеличения параметров цикла привело к существенному росту тепловых нагрузок их камер сгорания. 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. Такие явления приводят к серьёзным последствиям, начиная от вибрационных перегрузок и деформирования элементов конструкции камер сгорания, до прогаров и разрушения жаровых труб, газовой эрозии лопаток турбин, аварийных ситуаций с вынужденными остановками двигателей [3].

Поэтому обеспечение устойчивости процесса горения является серьёзной 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 [4]. Моделирование термо-акустических процессов производилось в два этапа: стационарный и нестационарный расчеты течения.

**Цель.** Определение пульсационных характеристик низкоэмиссионной камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 25 МВт методом математического моделирования процессов нестационарного горения.

#### Исследование

В качестве объекта исследования выбрана низкоэмиссионная КС с предварительным смешением топливо-воздушной смеси ГТД мощностью 25 МВт. Нестационарные расчеты проводились для номинального режима работы ГТД с использованием LES-модели турбулентности. Для исследований использовалась WALE-модификация модели турбулентности крупных вихрей.

**WALE-модель.** В данной модели [5, 6] турбулентная вязкость определяется по формуле:

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

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

$$L_s = \min(kd, C_w V^{1/3}), \quad S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left( \frac{-2}{g_{ij}} + \frac{-2}{g_{ji}} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{-2}{g_{kk}}, \quad \bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \quad \bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}.$$

(рис. 1,а) создана на основе трехмерных геометрических моделей и состоит из 20,929 млн. тетраэдрических ячеек. Такой большой размер сеточной модели объясняется тем, что при использовании нестационарных LES-моделей турбулентности одним из фильтров является размер ячейки. Следовательно, турбулентные вихри, размер которых меньше размера сетки ячейки, учитываться не будут.

Моделирование пульсационных и акустических процессов в КС связано с большими затратами временных и вычислительных ресурсов. Для их экономии использовалась сеточная модель, которая состоит из полигедральных ячеек. Полигедральные сеточные модели обладают большей устойчивостью и скоростью сходимости решения, чем тетраэдрические, за счет большего количества узлов, приходящихся на одну ячейку, и позволяют получить высокую точность решения на меньшем количестве ячеек - 4,97 млн. (рис.1, б) [7].

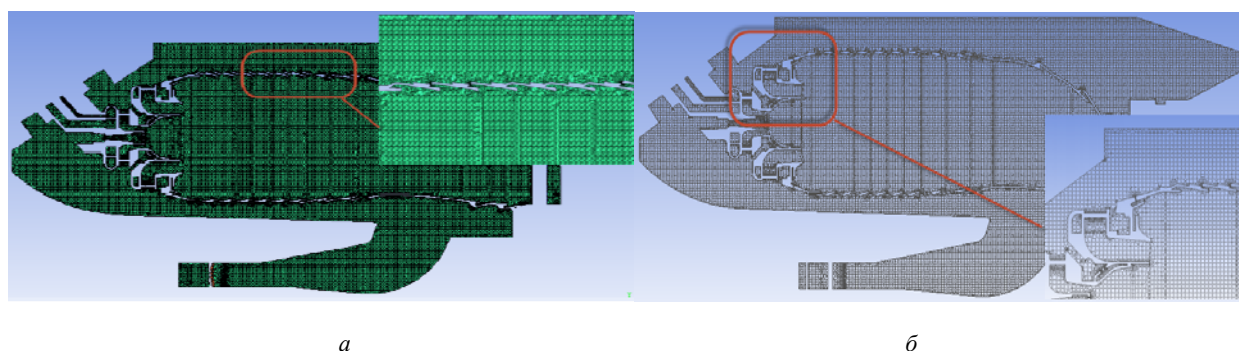


Рис. 1. Тетраэдрическая (а) и полигедральная (б) сеточные модели 1/16 КС ГТД

При нестационарных расчетах для промежуточных сечений и твердых стенок отслеживались пульсации статического давления, которые являются источниками акустических колебаний, и могут быть замерены при проведении натурного эксперимента.

В дополнение к выполненным расчетам, проведен расчет с пульсациями полного давления на входе в камеру сгорания, имитирующими пульсации от вращения компрессора высокого давления. Частота пульсаций принята равной частоте вращения компрессора 8000 об/мин, что составляет 133 Гц или 837,75 рад/с. Амплитуда пульсаций составляет 3000 Па.

Это потребовало изменения граничных условий и написания специальной udf-функции, позволяющей задать нестационарное граничное условие на входе.

Данная функция описывается формулой:

$$P_{tot} = P_{tot\_average} + A \cdot \sin(\omega \cdot t) = 427000 + 3000 \cdot \sin(837 \cdot t),$$

где  $P_{tot\_average}$  – среднее избыточное (превышающее *operating pressure*) давление на входе в камеру сгорания, Па, было увеличено в связи с тем, что потери полного давления на режиме горения возрастают;

$A$  – амплитуда давления, Па;

$\Omega$  – угловая скорость пульсаций, рад/с;

$t$  – время, с.

#### Основные результаты и их анализ

Для оценки влияния величины пульсаций построены среднеквадратичные отклонения статического давления за расчетный период времени. Зоны проявления максимальных пульсаций давления в объеме КС на режиме горения в целом аналогичны зонам, определенным при стационарных расчетах КС и отличаются от режима холодной продувки. Пульсации давления на режиме горения наблюдаются по всему объему жаровой трубы и имеют повышенные значения амплитуды по сравнению с режимом холодной продувки (рис.2).

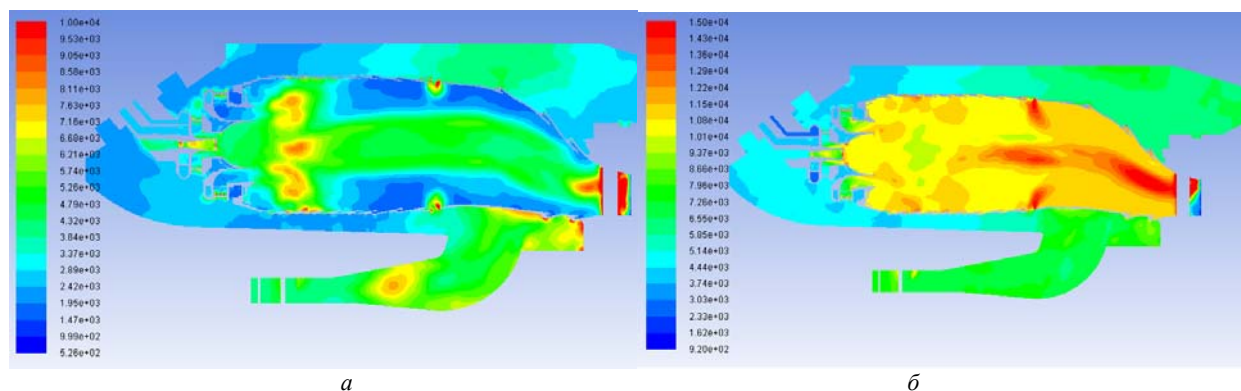


Рис. 2. Среднеквадратические значения пульсаций статического давления в камере сгорания для режима холодной продувки (а) и режима горения (б)

При статистической обработке сигналов давления использовалось преобразование Фурье. Для этого использовались встроенные инструменты ANSYS Fluent. На рис.3,а представлены амплитуды сигнала по спектру частот статического давления в сечении верхнего отверстия вторичного воздуха. Основной пик расположен на частоте 189 Гц с амплитудой 2652 Па, второстепенные пики расположены на частотах 151 Гц – 1284 Па, 353 Гц – 743 Па, 580 Гц – 628 Па. На рис.3, б представлены амплитуды сигнала статического давления с учетом пульсаций полного давления на входе в камеру сгорания, имитирующих пульсации от вращения компрессора высокого давления. Пики видны на частотах 81 Гц – 1380 Па, 133 Гц – 950 Па, 180 Гц – 1010 Па, 205 Гц – 970 Па, 322 Гц – 750 Па и 740 Гц – 550 Па. Дополнительные частоты интересны с точки зрения собственных частот колебания жаровой трубы, при совпадении которых с дополнительной частотой горения возможен резонанс, который может привести к разрушению элементов камеры сгорания.

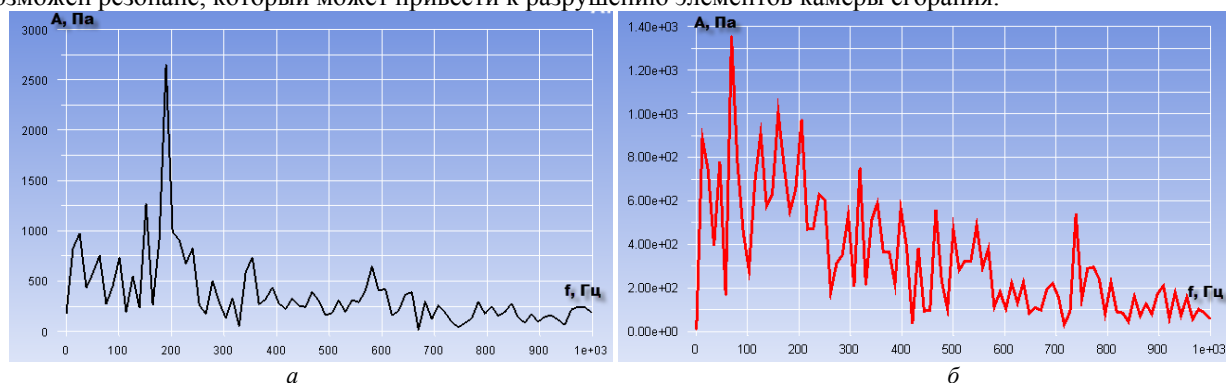


Рис. 3. Амплитуды сигнала статического давления в сечении верхнего отверстия вторичного воздуха без учета пульсаций (а) и с пульсациями полного давления (б) на входе в камеру сгорания

На рис.4, а показаны амплитуды сигнала по спектру частот статического давления в сечении жаровой трубы перед лопатками турбины. Основной пик расположен на частоте 189 Гц с амплитудой 2563 Па, второстепенные пики расположены на частотах 63 Гц – 922 Па, 151 Гц – 1116 Па, 252 Гц – 885 Па. С учетом пульсаций полного давления на входе в камеру сгорания основной пик находится на частоте горения 180 Гц – 1400 Па, а дополнительные пики находятся на частотах 81 Гц – 850 Па, 205 Гц – 1100 Па, 340 Гц – 700 Па, 420 Гц – 510 Па (рис.4, б).

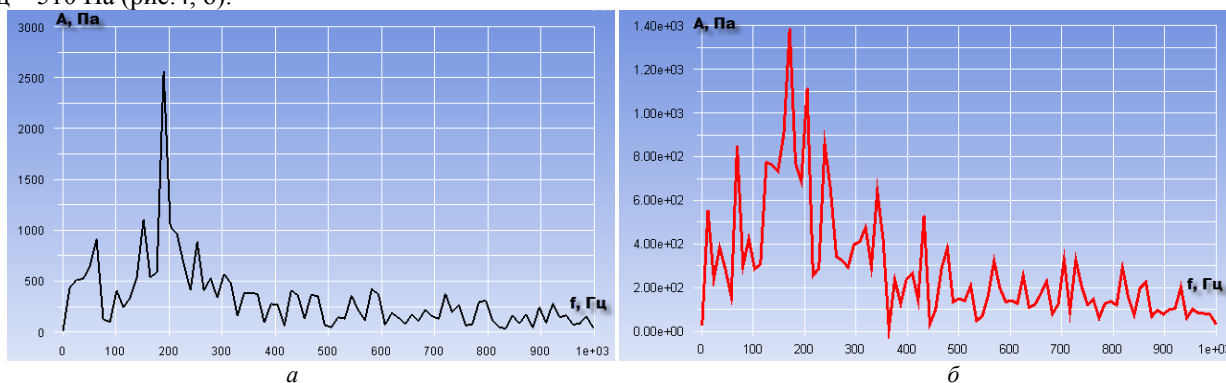


Рис. 4. Амплитуды сигнала статического давления в сечении жаровой трубы перед лопатками турбины без учета пульсаций (а) и с пульсациями полного давления (б) на входе в камеру сгорания

По результатам трехмерных расчетов наблюдаются максимальные по амплитуде пульсации:

- в центральном вихре внутри жаровой трубы;
- на отверстиях подвода вторичного воздуха;
- внутри жаровой трубы в районе 3-4-й обечаек – из-за вихреобразования в зоне обратных токов при выходе потока из каналов завихрителей;
- на стенках входного диффузора подвода воздуха из компрессора – вследствие отрыва потока от стенок входного диффузора из-за пульсаций за компрессором высокого давления;
- в выходном сечении жаровой трубы перед турбинными лопатками – из-за пульсации центрального вихря в жаровой трубе;
- на лопатках периферийного завихрителя;
- на отверстиях раздачи топлива в каналах завихрителя.

Одним из важных допущений, использованных в трехмерных расчетах, является то, что колебания внутри металла жаровой трубы не распространяются. Следовательно, колебания внутри жаровой трубы в результате процесса горения оказывают очень малое влияние на поток воздуха в межтрубном пространстве при расчетах. В реальных условиях пульсации внутри жаровой трубы оказывают влияние на поток в межтрубном пространстве, и будут уловлены датчиками пульсации давления. Эти датчики пульсации давления в связи с температурными ограничениями могут быть расположены только в межтрубном пространстве. Вследствие этого расчетные данные по амплитуде пульсаций нуждаются экспериментальной верификации и получения эмпирических зависимостей, позволяющих пересчитывать амплитуды пульсаций полного давления.

### Выводы

Проведен анализ пульсационных процессов в низкоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя с помощью инструментов вычислительной гидродинамики. В результате численного моделирования, определено, что максимальные пульсации статического давления проявляются внутри жаровой трубы в районе третьей ее обечайки, а также в выходном сечении жаровой трубы непосредственно перед турбинными лопатками.

Для всех сечений КС характерна частота 189 Гц. Возникновение этой частоты обусловлено именно процессами горения. Амплитуда пульсаций статического давления в зависимости от места отслеживания варьируется от 1,0 до 2,6 кПа. В тоже время локальные среднеквадратические пульсации статического давления внутри жаровой трубы достигают максимальных величин около 15 кПа.

При прохождении невозмущенного потока воздуха через входной диффузор генерируются дополнительные пульсации с частотой 422 Гц с амплитудой 0,89 кПа, которые впоследствии гасятся лопатками завихрителя, но могут отслеживаться датчиками пульсации давления, расположенными на корпусе.

На расчетном режиме с учетом пульсации давления воздуха от компрессора с амплитудой 3 кПа и частотой 133 Гц характерными расчетными частотами пульсаций являются 175 Гц и 205 Гц с амплитудами 0,8...0,4 кПа и 1,1...0,5 кПа, которые генерируются непосредственно процессами горения, что подтверждается характером изменения пульсаций температуры и массовой концентрации топлива. Эти частоты близки к основной частоте 189 Гц, полученной при расчете горения без учета пульсаций за компрессором. На стенках входного диффузора генерируются дополнительные пульсации с частотой 510 Гц и амплитудой 0,45 кПа, а также частотой 81 Гц и амплитудой 0,75 кПа. При этом пульсации высокой частоты (510 Гц) гасятся лопатками завихрителя, а более низкой частоты (81 Гц) прослеживаются и внутри жаровой трубы.

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

*Анотація.* Розглянуто питання числового моделювання термо-акустичних процесів в камерах згорання газотурбінних двигунів. Проведено аналіз пульсаційних процесів в низькоемісійній камері згорання газотурбінного двигуна за допомогою сучасних інструментів обчислювальної гідродинаміки. Представлені результати моделювання процесів нестационарного горіння в низькоемісійній камері згорання газотурбінного двигуна. За результатами тривимірних розрахунків визначено максимальні по амплітуді пульсації, що виникають у жаровій трубі і міжтрубному просторі камери згорання газотурбінного двигуна.

*Ключові слова:* газотурбінний двигун; камера згорання; пульсаційне горіння; числові методи; математичне моделювання.

*Abstract.* The use of modern tools of computational fluid dynamics for investigation the pulsation processes in the combustion chamber caused by the design features of flame tubes and aerodynamic interaction compressor, combustor and turbine is discussed.

*Purpose.* Investigation and forecasting of non-stationary processes in gas turbine low-emission combustion chambers using mathematical modeling.

*Design/methodology/approach.* The numerical experiment by definition of pressure pulsations level in the gas turbine combustion chamber is performed. The results of the numerical experiments using a three-dimensional mathematical models in gaseous fuels

combustion chambers adequately reflect the physical and chemical processes of unsteady combustion and can be recommended for optimizing the geometrical and operational parameters of low-emission combustion chambers.

*Findings.* According to the results of three-dimensional calculations, the maximum amplitude fluctuation arising in the flame tube and the annulus gas turbine combustion chambers are defined.

*Originality/value.* The application of such mathematical models for the creation new samples combustors operating at a lean air-fuel mixture as well as the modernization of the existing cameras to develop constructive measures aimed at reducing the likelihood of pulsation combustion modes, is advisable.

*Keywords:* gas turbine engine, combustion chamber, pulsating combustion, numerical methods, mathematical modeling.

#### Библиографический список использованной литературы

1. Герасименко В. П. Вибрационное горение в камерах сгорания ГТД / В. П. Герасименко, Н. Б. Налесный // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2006. – С. 1–6
2. Сербін С. І. Дослідження процесів нестационарного горіння в камері згорання ГТД / С. І. Сербін, Г. Б. Мостіпаненко, А. В. Козловський // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування: Вісник НТУ «ХПІ», - Харків : НТУ «ХПІ». – 2012. – №8. – С. 11-16.
3. Serbin S., Mostipanenko A., Matveev I. Investigation of the Working Processes in a Gas Turbine Combustor with Steam Injection // Proceedings of the ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference AJTEC2011. - March 13-17, 2011, Honolulu, USA, AJTEC2011-44042. – 6 p.3
4. Serbin S., Mostipanenko A., Matveev I. Investigation of the Working Processes in a Gas Turbine Combustor with Steam Injection // Proceedings of the ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference AJTEC2011. - March 13-17, 2011, Honolulu, USA, AJTEC2011-44042. – 6 p.3.
5. Serbin S.I. “Theoretical Investigations of the Working Processes in a Plasma Coal Gasification System” / S.I. Serbin, I.B. Matveev // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2010. – Vol. 38, no. 12, pp. 3300–3305.
6. Serbin S. I. Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection / S. I. Serbin, A. B. Mostipanenko, I. B. Matveev // Proceedings of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference. – Honolulu, Hawaii, USA. – 2011. – 13-17 March. – AJTEC2011-44042. – P. 6–11.
7. Peric M. CD-adapco The advantage of polyhedral meshes [Электронный ресурс] / М. Peric, S. Ferguson // ERCOFTAC Bulletin. – 2004. – Режим доступа : [http://www.plmmarketplace.com/upload/Temp/The\\_Advantage\\_of\\_polyhedral.pdf](http://www.plmmarketplace.com/upload/Temp/The_Advantage_of_polyhedral.pdf). – Заголовок с экрана.

#### References

1. Gerasimenko V. P. Vibracionnoe gorenje v kamerah sgoranija GTD. V. P. Gerasimenko, N. B. Nalesnyj. Jenergeticheskie i teplotehnicheskie processy i oborudovanie. 2006. P. 1–6.
2. Serbin S. I. Doslidzhennja procesiv nestacionarnogo gorinnja v kameri zgorjannja GTD. S. I. Serbin, G. B. Mostipanenko, A. V. Kozlovs'kij. Energetichni ta teplotehnichni procesi j ustatkuvannja: Visnik NTU «HPI», Har'kov: NTU «HPI». 2012. No 8. P. 11-16.
3. Serbin S., Mostipanenko A., Matveev I. Investigation of the Working Processes in a Gas Turbine Combustor with Steam Injection. Proceedings of the ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference AJTEC2011. March 13-17, 2011, Honolulu, USA, AJTEC2011-44042. 6 p.3.
4. Serbin S., Mostipanenko A., Matveev I. Investigation of the Working Processes in a Gas Turbine Combustor with Steam Injection. Proceedings of the ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference AJTEC2011. March 13-17, 2011, Honolulu, USA, AJTEC2011-44042. 6 p.3.
5. Serbin S.I. “Theoretical Investigations of the Working Processes in a Plasma Coal Gasification System”. S.I. Serbin, I.B. Matveev. IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. Vol. 38, no. 12, pp. 3300–3305.
6. Serbin S. I. Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection. S. I. Serbin, A. B. Mostipanenko, I. B. Matveev. Proceedings of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference. Honolulu, Hawaii, USA. 2011. 13-17 March. AJTEC2011-44042. P. 6–11.
7. Peric M. CD-adapco The advantage of polyhedral meshes [Электронный ресурс]. М. Peric, S. Ferguson. ERCOFTAC Bulletin. 2004. Режим доступа : [http://www.plmmarketplace.com/upload/Temp/The\\_Advantage\\_of\\_polyhedral.pdf](http://www.plmmarketplace.com/upload/Temp/The_Advantage_of_polyhedral.pdf). Заголовок с экрана.

Подана до редакції 04.08.2015