

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРНОГО ВЕНЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАТФОРМЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ OPENFOAM

*Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: mellsv84@gmail.com*

В настоящее время процесс проектирования компрессорных венцов включает в себя обязательную расчетную проверку прочностных характеристик в САЕ-системах типа ANSYS, NASTRAN и др. Эти расчеты не отменяют натурных испытаний, однако их проведение позволяет значительно повысить вероятность удовлетворительных испытаний; в связи с сокращением объема испытаний радикальным образом снижается стоимость и время доводки. Аналогично прочностным расчетам трехмерные газодинамические расчеты играют роль натурных испытаний с целью доводки конструкции до необходимых параметров. Тем не менее, на сегодняшний день инструментарий для решения указанных задач представлен в основном коммерческими пакетами, стоимость которых достаточно велика. Также, далеко не всегда раскрыты заложенные в них модели и алгоритмы, что не позволяет проектировщику полностью доверять получаемым результатам. Кроме того, представляет значительный научный и практический интерес совместное решение указанных выше задач, что позволило бы существенно сократить время проектирования и значительно повысить его эффективность. Учитывая вышесказанное, актуальной является разработка научно-методического обеспечения для решения задачи расчета прочности лопаток компрессорных венцов. Разработано научно-методическое обеспечение, которое позволяет совместно решать задачу численного моделирования пространственных турбулентных газовых течений в компрессорных венцах и задачу расчета прочности лопаток компрессорных венцов. Данное обеспечение разработано с применением решателей библиотеки OpenFOAM для расчета поля течения в межлопаточном канале и напряженно-деформированного состояния лопатки. Взаимодействие решателей осуществляется через передачу данных в граничных условиях. Предполагается, что изменением формы лопатки под воздействием газового потока можно пренебречь. Выполнено тестирование разработанного научно-методического обеспечения путем решения задачи о взаимодействии заземленной балки с обтекающим ее потоком. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с результатами решения данной задачи с использованием стандартного решателя icoFSIFoam, входящего в состав ветки OpenFOAM extensions. Выполнен расчет поля течения в межлопаточном канале осевого компрессорного венца и расчет напряженно-деформированного состояния его лопатки. Качественный анализ полученных результатов свидетельствует о работоспособности разработанного научно-методического обеспечения. В дальнейшем предполагается проведение дополнительных исследований по оценке его работоспособности и применимости с привлечением соответствующих экспериментальных данных.

У теперішній час процес проектування компресорних вінців включає до себе обов'язкову розрахункову перевірку міцності в САЕ-системі типу ANSYS, NASTRAN та ін. Ці розрахунки не скасовують натурних випробувань, проте їх проведення дозволяє значно підвищити ймовірність задовільних випробувань; у зв'язку зі скороченням обсягу випробувань радикальним чином знижується вартість і час доведення. Аналогічно розрахункам міцності тривимірні газодинамічні розрахунки відіграють роль натурних випробувань з метою доведення конструкції до необхідних параметрів. Проте, на сьогоднішній день інструментарій для розв'язання зазначених задач представлено в основному комерційними пакетами, вартість яких досить велика. Також, далеко не завжди розкрито закладені в них моделі і алгоритми, що не дозволяє проектувальнику повністю довіряти отриманим результатам. Крім того, представляє значний науковий і практичний інтерес спільне розв'язання зазначених вище задач, що дозволило б істотно скоротити час проектування і значно підвищити його ефективність. З огляду на вищесказане, актуальною є розробка науково-методичного забезпечення для розв'язання задачі розрахунку міцності лопаток компресорних вінців. Розроблено науково-методичне забезпечення, яке дозволяє спільно розв'язувати задачу чисельного моделювання просторових турбулентних газових течій в компресорних вінцях і завдання розрахунку міцності лопаток компресорних вінців. Дане забезпечення розроблено із застосуванням вирішувачів бібліотеки OpenFOAM для розрахунку поля течії у міжлопатковому каналі і напружено-деформованого стану лопатки. Взаємодія вирішувачів здійснюється через передачу даних в граничних умовах. Передбачається, що зміною форми лопатки під впливом газового потоку можна знехтувати. Виконано тестування розробленого науково-методичного забезпечення шляхом розв'язання задачі про взаємодію затисненої балки з потоком, що обтікає її. Отримані результати задовільно узгоджуються з результатами розв'язання даної задачі з використанням стандартного вирішувача icoFSIFoam, що входить до складу гілки OpenFOAM extensions. Виконано розрахунок поля течії в міжлопатковому каналі осевого компресорного вінця і розрахунок напружено-деформованого стану його лопатки. Якісний аналіз отриманих результатів свідчить про працездатність розробленого науково-методичного забезпечення. Надалі передбачається проведення додаткових досліджень з оцінки його працездатності і застосовності із залученням відповідних експериментальних даних.

© С. В. Мелашич, 2017

The now design of compressor rims requires a computational verification of strength characteristics using the CAE systems such as ANSYS, NASTRAN, etc. Those computations do not abolish field tests, however, they significantly increase the probability of satisfactory tests; due to the reduction of tests, costs and time for fine-tuning are drastically cut. Similarly to strength computations, three-dimensional gas-dynamic ones play the role of full-scale tests to finalize the design to the required parameters. Nevertheless, today's tools for solving those problems are mainly presented by commercial high-priced packaged programs. Also, it does not always happen that they reveal models and algorithms incorporated. Thus, the results obtained are suspect for the designer. In addition, the simultaneous solution of the above-mentioned problems is of considerable scientific and practical interest, resulting in significant design time cutting and the improved design efficiency. On this basis, the development of scientific and methodic support for designing the compressor rim blades strength is topical. The scientific and methodic support has been developed to solve simultaneously the problem of a numerical simulation of spatial turbulent gas flows through compressor rims and the problem of the computation of the strength of the compressor rim blades. This software has been developed using solvers of the OpenFOAM library to compute the flow field in the vane channel and a stressed-strained state of the blade. Solvers interact via the data communication under boundary conditions. It is assumed that the change in the shape of the blade under the influence of the gas flow can be neglected. The developed scientific and methodic support has been tested solving the problem of interactions between the clamped beam and its streamlined flow. The results obtained agree satisfactorily with the results of the solution of this problem using the standard icoFSIFoam solver, which is part of the branch of the OpenFOAM extensions. The flow field in the vane channel of the axial compressor rim and the stressed-strained state of its blade have been computed. A qualitative analysis of the obtained results demonstrates the applicability of the developed scientific and methodic support. In the future, additional studies are assumed to conduct for evaluating its efficiency and applicability with the use of the corresponding experimental data.

Ключевые слова: *компрессорный венец, лопатка компрессорного венца, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, FSI задача, OpenFOAM, уравнения Навье–Стокса, интенсивность напряжений по фон Мизесу.*

Введение. В настоящее время практически все проектные работы в отечественных и зарубежных конструкторских бюро ведутся с применением ЭВМ. Очевидно, что радикальное повышение эффективности процесса проектирования сложных надежных изделий возможно лишь с применением комплексных систем, охватывающих весь жизненный цикл существования изделия.

В традиционных методах проектирования, которые повсеместно преобладали до внедрения CAD/CAE-систем, основным инструментом при доводке изделий были натурные испытания как в составе изделия в целом, так и с использованием поузловой доводки.

В двух словах, метод натурных испытаний выглядит следующим образом: конструктор создает вариант конструкции, ее изготавливают в производстве, ставят на стенд или установку и испытывают. Если испытания не дали положительных результатов (например, несоответствие техническим требованиям, поломка детали), то конструктор создает новый вариант и все повторяется заново. В отдельных случаях такие циклы: «проектирование – изготовление – испытание» требуется проводить десятки раз.

Появление трехмерных методов проектирования (CAD) и трехмерных методов прочностного, теплового, гидрогазодинамического анализа (CAE) позволило несколько изменить технологию проектирования.

В настоящее время процесс проектирования компрессорных венцов включает в себя обязательную расчетную проверку прочностных характеристик в CAE-системе типа ANSYS, NASTRAN и др. Эти расчеты не отменяют натурных испытаний, однако их проведение позволяет значительно повысить вероятность удовлетворительных испытаний; в связи с сокращением объема испытаний радикальным образом снижается стоимость и время доводки. Аналогично прочностным расчетам трехмерные газодинамические расчеты играют роль натурных испытаний с целью доводки конструкции до необхо-

димых параметров [1]. Тем не менее, на сегодняшний день инструментарий для решения указанных задач представлен в основном коммерческими пакетами, стоимость которых достаточно велика. При этом, далеко не всегда раскрыты заложенные в них модели и алгоритмы, что не позволяет проектировщику полностью доверять получаемым результатам. Кроме того, представляет значительный научный и практический интерес совместное решение указанных выше задач, что позволило бы существенно сократить время проектирования и значительно повысить его эффективность.

Учитывая вышесказанное, разработка научно-методического обеспечения для решения задачи расчета прочности лопаток компрессорных венцов является актуальной

Лопатки компрессорных венцов испытывают действие центробежных сил вращения и аэродинамических сил газового потока. Эти силы вызывают в рабочих лопатках напряжения растяжения, изгиба и кручения. Центробежные силы относятся к стационарным силам, и от них зависит статическая кратковременная и длительная прочность лопаток. Аэродинамические силы имеют как статические, так и динамические составляющие. Именно переменные составляющие определяют динамические напряжения и вибрационную прочность лопаточного аппарата. Динамические напряжения в рабочих лопатках обусловлены многими причинами: вибрацией ротора; окружной неравномерностью газового потока; неравномерностью потока в сопловых каналах; отрывными явлениями у корня и на периферии. Определить их гораздо труднее, чем статические, но важным является то, что они пропорциональны статическим напряжениям [3].

Процесс определения напряжений в лопатке часто разделяется на два этапа.

I этап – определение растягивающих напряжений. На данном этапе требуется лишь твердотельная модель лопатки и данные о материале лопатки (плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона и др.).

II этап – определение изгибающих напряжений. В дополнение к данным, заданным на первом этапе, вычисление изгибающих напряжений требует проведения газодинамического расчета для получения количественной оценки силового воздействия потока на лопатку компрессорного венца.

Задача второго этапа относится к классу так называемых FSI (Fluid-Structure Interaction) задач, требующих описания взаимодействия жидкости и деформируемого твердого тела. Существует два подхода к решению задач подобного типа.

Разделенный подход. Этот подход предназначен для слабосвязанных FSI задач, т. е. таковых, когда изменения геометрии тела незначительны и слабо влияют на течение жидкости. Данный подход характеризуется использованием отдельных математических моделей для жидкости и твердого тела, отдельными и, возможно, различными способами их дискретизации, связь между моделями осуществляется за счет передачи данных на границах взаимодействия жидкость – твердое тело.

Единый подход. Предназначен для решения задач с сильным взаимным воздействием между жидкостью и твердым телом. Характеризуется различными уровнями связи: единая матмодель; единая матмодель и схема дискретизации; единая процедура решения (общая матрица исходных уравнений решается одним решателем) [4].

В рамках стандартной линейки версий пакета программ OpenFOAM на сегодняшний день не существует FSI-решателей. В альтернативно разрабатываемой ветке OpenFOAM-extensions существует разработки FSI-решателей, которые позволяют решать слабосвязанные FSI задачи взаимодействия деформируемого твердого тела с потоком вязкой несжимаемой жидкости.

Постановка задачи. В рамках данной работы рассматривается вопрос разработки научно-методического обеспечения для решения слабосвязанной FSI задачи в рамках разделенного подхода. Научно-методическое обеспечение основывается на следующих допущениях.

Допущение 1. Течение газа в межлопаточном канале компрессорных венцов описывается системой осредненных уравнений Навье–Стокса [5], замкнутых с помощью некоторой модели турбулентности.

Допущение 2. Напряженно-деформированное состояние твердого тела описывается уравнением

$$\frac{\partial^2(\rho D)}{\partial t^2} - \nabla \cdot [\mu \nabla D + \mu (\nabla D)^T + \lambda I \cdot \text{tr}(\nabla D)] = 0, \quad (1)$$

где D – вектор перемещения; ρ – плотность твердого тела; μ, λ – коэффициенты Ламе; I – единичная матрица; ∇ – оператор Набла.

Допущение 3. Изменениями формы лопатки под воздействием действующих на нее сил можно пренебречь.

Алгоритм решения задачи. Учитывая вышесказанное, схема работы разрабатываемого научно-методического обеспечения для решения задачи расчета прочности лопаток компрессорных венцов может быть представлена в следующем виде (рис. 1).



Рис. 1

Расчет поля течения в межлопаточном канале компрессорного венца выполняется путем численного моделирования течения, основанного на численном интегрировании системы уравнений Навье–Стокса с использованием решателей rhoMRFPimpleFoam или transonicDyMFoam. В качестве модели турбулентности используется, как правило, либо модель турбулентности Спаларта–Аллмараса [6], либо $k-w$ модель Ментера [7].

Определение силового воздействия заключается в определении распределений давления и компонентов тензора напряжений на границах раздела сред: газ – твердое тело. Расчет распределений осуществляется с использованием утилиты `sample`.

Полученные распределения пересчитываются с учетом расчетной сетки, используемой для расчета напряженно-деформированного состояния твердого тела, и используются в качестве исходных данных при построении граничных условий.

При расчете параметра в точке используется пространственная интерполяция. Например, давление в некоторой точке рассчитывается как

$$p(x, y, z) = ar^2 + br + c, \quad (2)$$

где r – расстояние до некоторой точки, давление в которой известно.

Таким образом, чтобы однозначно задать давление в некоторой точке (x, y, z) , необходимо определить значения коэффициентов a, b, c . Для их определения используются значения давления в трех точках, ближайших к (x, y, z) .

Тогда давление в точке (x, y, z) определяется из выражения (2), где коэффициенты a, b, c определяются в результате решения системы

$$\begin{cases} p_1 = ar_1^2 + br_1 + c \\ p_2 = ar_2^2 + br_2 + c, \\ p_3 = ar_3^2 + br_3 + c \end{cases} \quad (3)$$

где $r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}$ – расстояние до одной i -й точки; p_i – давление в i -й точке; (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) – координаты трех точек, ближайших к (x, y, z) .

Расчет напряженно-деформированного состояния осуществляется с использованием решателей типа `solidDisplacementFoam`.

Верификация. С целью оценки работоспособности научно-методического обеспечения для решения задачи расчета прочности лопаток компрессорных венцов решим с его помощью тестовую задачу о взаимодействии потока жидкости с заземленной балкой. Сравним полученные результаты с результатами, полученными с использованием стандартного решателя `icoFSIFoam`, входящего в состав ветки `OpenFOAM-extensions`.

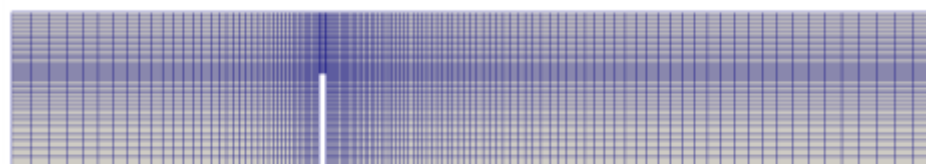
На рис. 2, а) представлена расчетная сетка, используемая для решения такой задачи.

На рисунке 2, б) представлено распределение модуля скорости, полученное в области взаимодействия с использованием решателя `icoFSIFoam`. Из рисунка 2, б) видно, что в рамках решателя `icoFSIFoam` реализовано взаимодействие жидкости с твердым телом с учетом изменения формы твердого тела под действием потока жидкости.

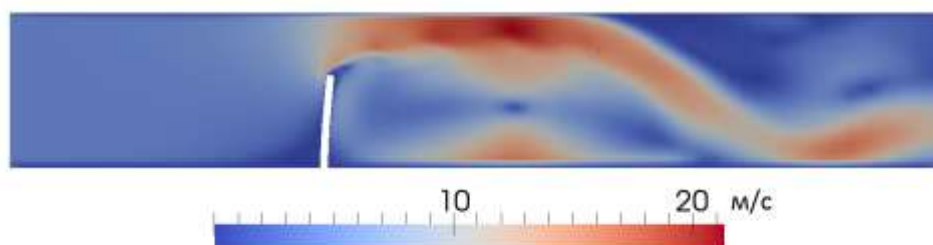
На рисунке 2, в) приведено распределение модуля скорости в области взаимодействия жидкости с балкой, полученное с использованием решате-

ля rhoPimpleFoam в рамках разрабатываемого научно-методического обеспечения.

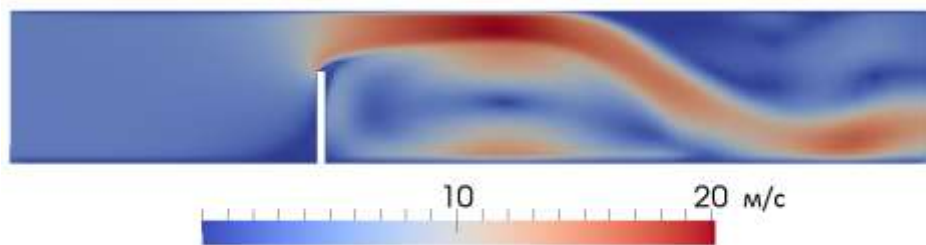
Полученные в результате распределения избыточного давления \bar{p} вдоль обезразмеренного обвода балки \bar{h} по отношению к давлению набегающего потока приведены на рисунке 3. При этом сплошной кривой обозначено распределение избыточного давления, полученное с использованием решателя rhoPimpleFoam, применяемого в рамках разрабатываемого научно-методического обеспечения, а маркерами – распределение избыточного давления, полученное с использованием решателя isoFSIFoam.



а)



б)



в)

Рис. 2

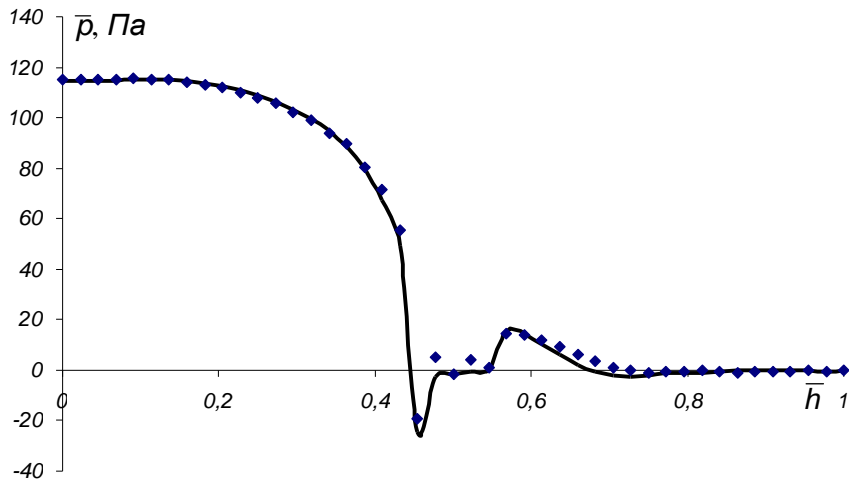


Рис. 3

Для оценки прочности конструкции используется теория наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения фон Мизеса, которая в настоящее время часто применяется при решении задач расчета прочности турбомашин [8].

В рамках данной теории рассчитывается интенсивность напряжений, которая определяется как

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12} + \sigma_{23} + \sigma_{31})}{2}}, \quad (4)$$

где σ_{eq} – интенсивность напряжений; σ_{ij} – тензор напряжений.

На рис. 4 представлены полученные поля распределения интенсивности напряжений в балке.

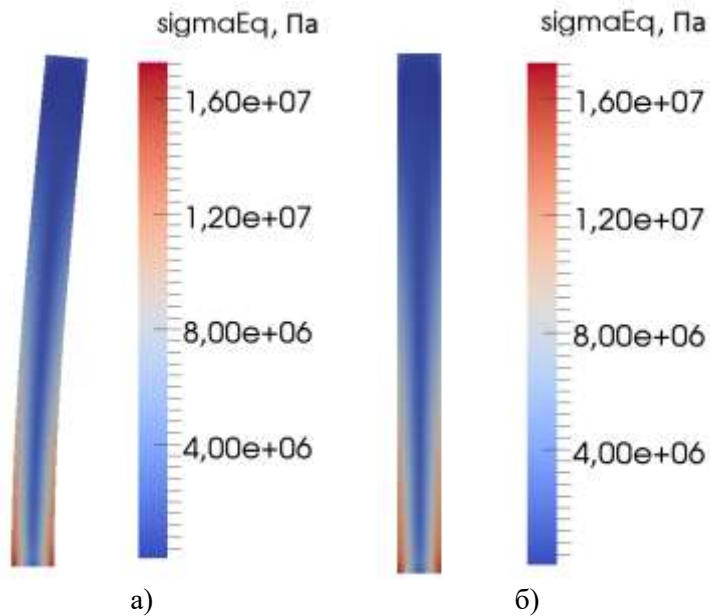


Рис. 4

При этом, на рис. 4, а) показана интенсивность напряжений, полученная с использованием решателя `icoFSIFoam`, а на рис. 4, б) – интенсивность напряжений, полученная с использованием решателя `rhoPimpleFoam`, используемого в рамках разрабатываемого научно-методического обеспечения.

Видно, что полученные распределения удовлетворительно согласуются между собой, что дает возможность в дальнейшем применять разработанное научно-методическое обеспечение для решения задачи расчета прочности лопаток компрессорных венцов с сохранением выдвинутых ранее предположений.

Расчет напряженно-деформированного состояния лопатки компрессорного венца. Теперь рассмотрим возможность применения данного научно-методического обеспечения непосредственно к решению задачи расчета прочности лопатки компрессорного венца. На рис. 5, а) представлена расчетная сетка межлопаточной области, используемая при численном моделировании течения в ней.

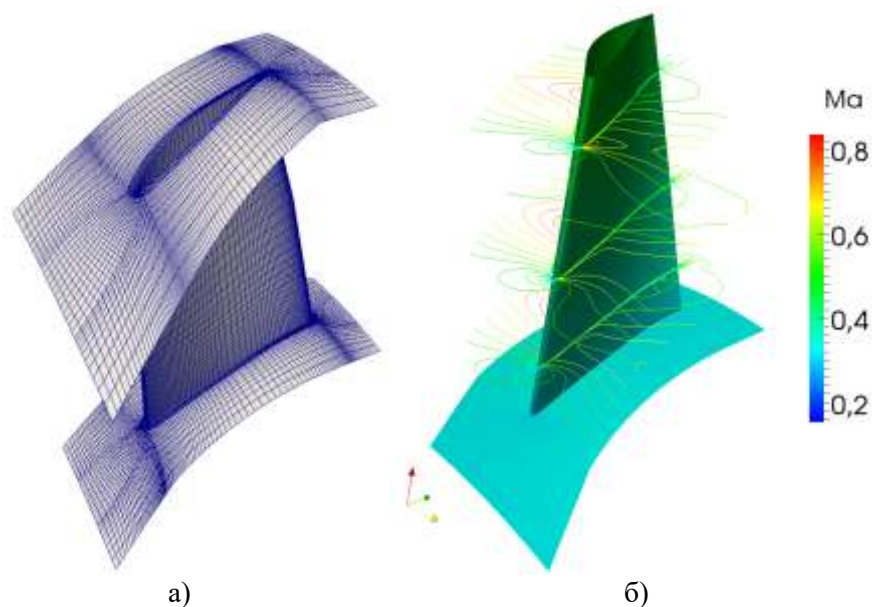


Рис. 5

На рис. 5, б) представлены изолинии Маха в различных сечениях межлопаточной области.

Для расчета напряженно-деформированного состояния лопатки использована неструктурированная расчетная сетка, приведенная на рис. 6, а).

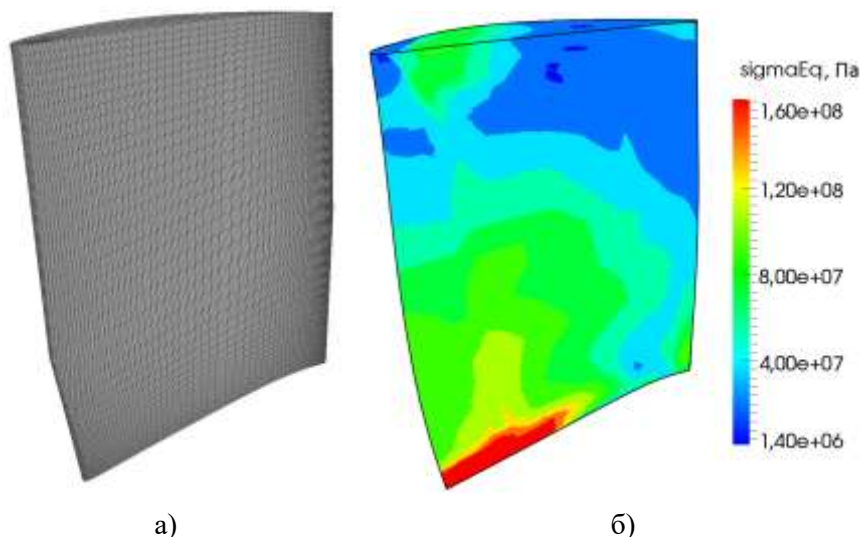


Рис. 6

Полученное в результате распределение интенсивности напряжений (4) представлено на рис. 6, б). Качественно оно соответствует аналогичным результатам, представленным, например, в работах [9, 10]. Тем не менее, для полной оценки работоспособности представленного научно-методического обеспечения необходимо проведение дальнейших исследований с привлечением результатов экспериментальных исследований.

Выводы. Разработано научно-методическое обеспечение для совместного решения задачи численного моделирования пространственных турбулентных газовых течений в компрессорных венцах и задачи расчета прочности лопаток компрессорных венцов. Данное обеспечение разработано с применением решателей библиотеки OpenFOAM для расчета поля течения в межлопаточном канале и напряженно-деформированного состояния лопатки. Взаимодействие решателей осуществляется через передачу данных в граничных условиях. Предполагается, что изменением формы лопатки под воздействием газового потока можно пренебречь.

Выполнено тестирование разработанного научно-методического обеспечения путем решения задачи о взаимодействии заземленной балки с набегающим потоком. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с результатами решения данной задачи с использованием стандартного решателя `icoFSIFoam`, входящего в состав ветки `OpenFOAM-extensions`.

Выполнен расчет поля течения в межлопаточном канале осевого компрессорного венца и расчет напряженно-деформированного состояния его лопатки. Качественный анализ полученных результатов свидетельствует о работоспособности разработанного научно-методического обеспечения. В дальнейшем предполагается проведение дополнительных исследований по оценке его работоспособности и применимости с привлечением соответствующих экспериментальных данных.

1 *Иноземцев А. А.* Газотурбинные двигатели. Пермь: ОАО «Авиадвигатель». 2006. 1202 с.

2 OpenFOAM User Guide. OpenFOAM Foundation. URL: <http://cfd.direct/openfoam/user-guide/> (дата обращения: 15.05.2017)

- 3 *Богомолова Т. В.* Применение ANSYS-FLUENT для прочностных расчетов рабочих лопаток последних ступеней. Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. Выпуск 66. С. 1 – 10 .
- 4 *Tukovic Z.* FVM for Fluid-Structure Interaction with Large Structural Displacements. OpenFOAM Wiki. 2009. 23 p. URL: http://sourceforge.net/projects/openfoam-extend/files/OpenFOAM_Workshops/OFW2_2007_Zagreb/WorkshopZagrebJun2007/presentations/capabilityTalks/slidesConjugateAndFSI.pdf (last accessed: 15.05.2017)
- 5 *Tannehill J. C.* Computational fluid dynamics and heat transfer. New York: Taylor & Francis. 1997. 785 p.
- 6 *Spalart P. R.* A one-equation turbulence model for aerodynamic flow. AIAA Journal. 1992. Vol. 12. N 1. P. 439 – 478.
- 7 *Menter F. R.* Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal. 1994. Vol. 32. N 8. P. 1598 – 1605.
- 8 *Mueller L.* Multidisciplinary Optimization of a Turbocharger Radial Turbine. Journal of Turbomachinery. 2012. Vol. 135. Is. 2. P. 20 – 28.
- 9 *Koopmans M.* Turbine Blade FEA Project. Lectures from Cal Poly San Luis Obispo. 10. p. URL: http://michaelkoopmans.com/ME404_calpoly.pdf (last accessed: 15.05.2017)
- 10 *Srivastava S.* Design analysis of Mixed Flow Pump Impeller Blades Using ANSYS and Prediction of its Parameters using Artificial Neural Network. Procedia Engineering. 2014. Vol. 97. P. 2022 – 2031.

Получено 29.05.2017,
в окончательном варианте 22.06.2017