

УДК 621.515

**В.П. ГЕРАСИМЕНКО<sup>1</sup>, М.Ю. ШЕЛКОВСКИЙ<sup>2</sup>, С.А. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина<sup>2</sup>ГП НПКГ «Заря»-«Машпроект», Украина**АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА**

*Рассмотрены основные методы аэродинамических расчетов, используемые при решении задач внутренней и внешней аэродинамики, современные направления развития численных методов решения уравнений Навье-Стокса. Показана классификация по основным признакам. Приведены программные комплексы, используемые для решения осредненных по Фавру-Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Обращено внимание на необходимость разработки комплексных методов аэродинамических расчетов, построенных на решении прямых задач, для решения обратной задачи с одновременной геометрической оптимизацией лопаточных венцов на основе существующих программных комплексов.*

**Ключевые слова:** турбомашина, лопаточный венец, уравнение, турбулентность, трехмерное математическое моделирование.

**Введение**

Аэродинамическое совершенствование компрессоров представляет собой обратную задачу их проектирования. Успех решения подобных краевых задач математической физики определяется их корректной постановкой, обеспечивающей существование единственности решения [1]. Простейшим примером такой гидродинамической задачи является задача Коши [2], в которой для уравнения второго порядка с заданием краевых условий в виде значений решения и его первых производных существует однозначное решение, за исключением линии раздела, на которой имеется неединственное решение. К такому уравнению, в частности, относится эллиптическое уравнение Лапласа при решении уравнений потенциального безвихревого движения жидкости — газа в форме Эйлера. Справедливость теоремы о единственности решения, реализуемой для уравнений эллиптического типа (при дозвуковых режимах течения), не выполняется для гиперболических уравнений (при сверхзвуковых режимах) [2], с учетом волновых потерь.

Корректность одной и той же задачи зависит от ее постановки. Основным признаком некорректно поставленной задачи является то, что как угодно малые изменения исходных данных могут приводить к большим изменениям решения. К подобным задачам относится большинство обратных задач, тесно связанных с интерпретацией физических экспериментов. Для решения таких задач в настоящее время существуют рекомендации приближенного решения с использованием дополнительной априорной информации [3].

**1. Постановка задачи**

Особую область задач представляют задачи аэрогидродинамики, для которых теоретические уравнения, описывающие процессы течения часто лишь приближенно отражают многие физические явления, что требует их дополнительных экспериментальных исследований для математического моделирования. Простейшим примером дискретного математического моделирования и расчетов является применение метода дискретных вихрей для плоской и пространственной задачи обтекания крыла [4]. В частности, необходимы модели учета вязкости. Одной из простых моделей является разбиение расчетной области на зоны с потенциальным течением и другой зоны с заданной завихренностью для описания турбулентных движений [2] и учета турбулентной вихревой — вращательной  $\mu_\omega$  вязкости наряду со сдвиговой  $\mu$  и объемной  $\mu_\Omega$  в обобщенном уравнении Навье-Стокса [5]:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla P - \rho F - \mu \Delta v - \left( \frac{\mu}{3} + \mu_\Omega \right) \nabla \nabla \cdot v - \mu_\omega \nabla \times (2\omega - \nabla \times v) = 0 \quad (1)$$

Обширные сведения о классических методах исследования турбомашин изложены в работах [6, 7].

В настоящее время существует достаточно большое количество методов решения аэродинамических задач [8]. Их можно классифицировать по основным признакам: для расчета

внутренних и внешних; невязких и вязких; ламинарных и турбулентных течений; расчета несжимаемой и сжимаемой среды; дозвуковых, транзвуковых и сверхзвуковых потоков; расчета потенциальных (безвихревых) и вихревых течений. Существуют методы расчета стационарных и нестационарных; одномерных, двумерных и трехмерных потоков; безотрывных или отрывных течений; в прямой, обратной и гибридной постановке [9].

Различные методы расчета применяют в зависимости от типа и постановки задач, начиная от поиска аналитических до численных решений с дискретизацией основных уравнений на мелкой сетке, покрывающей физическую область исследования, в дифференциальной или интегральной постановке [10]. По каждому из перечисленных типов задач опубликованы обзорные статьи, монографии с указанием наиболее приемлемых методов решения, преимущества и ограничения областей применимости [8-10]. Однако, нет достаточно общих публикаций с полной классификацией и анализом интегральных и дифференциальных уравнений и обоснованием выбора метода их решения.

**Целью данной статьи** является анализ расчетных методов аэродинамического совершенствования компрессоров на стадии их проектирования. Отличительной особенностью такого проектирования является необходимость решения аэродинамической задачи в обратной постановке, для чего требуется привлечение математических моделей – характеристик экспериментальных исследований для регуляризации решений [3]. В методиках проектирования компрессоров для этого используют три вида априорной информации:

- по проявлению инерционных свойств потока в виде его отставания в решетках профилей;

- по проявлению вязких эффектов и других источников потерь (с учетом перетеканий в радиальном зазоре);

- по газодинамической устойчивости и срыву.

Отличительной особенностью компрессорных диффузорных решеток профилей является наличие вихревых – отрывных областей в двугранном углу у спинки лопаток на втулке рабочего колеса и в радиальном зазоре в виде вихря перетекания, где целесообразно учитывать проявление вихревой вязкости, особенно при оценке запасов по срыву. В таком случае необходимо было бы записывать уравнение движения в форме завихренности с одной стороны, а с другой – использовать метод дискретных вихрей. Эти особенности принципиально отличают статистические характе-

ристики компрессорных решеток профилей от турбинных при их проектировании.

### Результаты исследования

Фундаментальные уравнения газовой динамики основаны на универсальных законах сохранения массы, количества движения, энергии [11]. Для описания процессов течения жидкости и газа в общем случае используют систему нестационарных дифференциальных уравнений Навье-Стокса в частных производных:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \\ = X_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \end{aligned} \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (2)$$

где  $\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\vartheta}) = 0$   
 где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,

$\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Поиск точных решений уравнений Навье-Стокса, в силу их нелинейности, является сложной задачей [8-10]. Поскольку в настоящее время аналитические методы решения данной системы в общем виде отсутствуют, для анализа течения в аэродинамических задачах используют численное моделирование [12]. Существующие методы аэродинамических расчетов, прежде всего, можно разделить на задачи внешней (в которых размеры области вокруг объектов предполагаются бесконечными) и внутренней аэродинамики (рис. 1).

При решении задач внешнего обтекания широко используют панельные методы [12] и особенностей (присоединенных-дискретных вихрей [4, 13], источников и стоков [14]), конечных элементов, конечных объемов [12], граничных элементов [15]. Применяют также численное моделирование на основе решения уравнений Эйлера и Навье-Стокса [8-10], в т.ч. в интегральном виде [16]. Повышение точности каждого метода связано с необходимостью роста вычислительных ресурсов, требуемых для его использования.

Особенностью расчета внутренних течений в турбомашине является аэродинамическое взаимодействие между лопаточными венцами. Задачи внутренней аэродинамики турбомашин традиционно разделяют на классы: прямые, обратные [17] и гибридные [18]. При решении прямой задачи определяют параметры потока

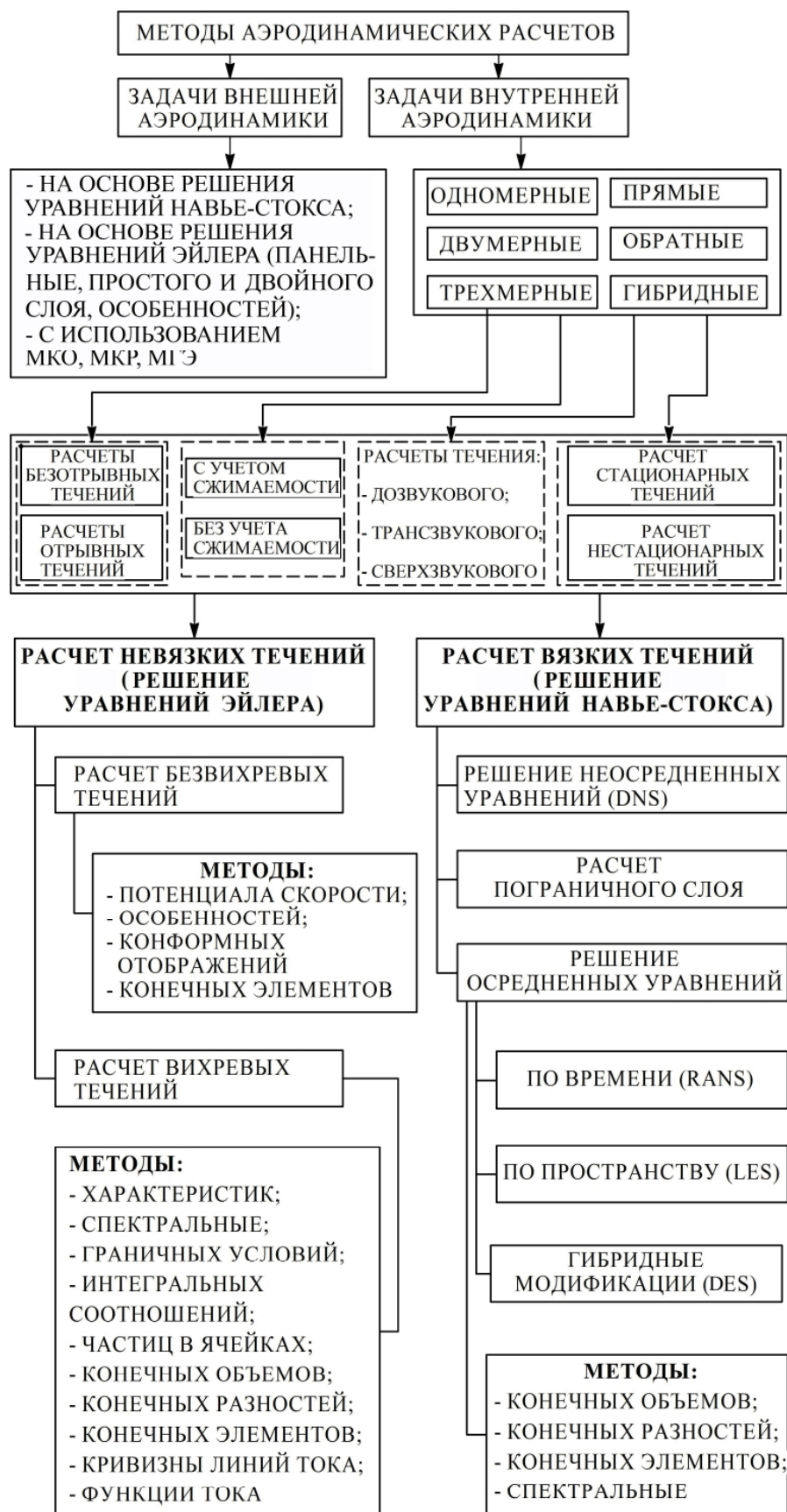


Рис. 1. Классификация методов аэродинамических расчетов

по заданной геометрии профилей. При решении обратной задачи требуется определить оптимальные формы межлопаточных каналов, обеспечивающие максимально возможный энергообмен в компрессорной ступени с минимальными потерями и допустимые запасы устойчивости [19]. Наиболее распространены двумерные методы решения обратной задачи: особенностей, конформных отображений, годографа, функции тока, прогонки, потенциала скорости, метод кривизны линий тока и т.д. [6-8]. При этом в большинстве случаев предполагали течение установившимся, а жидкость – идеальной. В гибридных задачах [18] принимают одни граничные условия – геометрические, а другие – аэродинамические.

Методы расчета внутренних течений кроме того разделяют на одномерные, двумерные и трехмерные. Выделяют методы расчета невязких (идеальных) и вязких течений при решении уравнений движения в форме Эйлера или Навье-Стокса. В рамках такой классификации дополнительно используют и другие предположения [8-12].

В численных методах, основанных на одномерном подходе, рассматривают осредненное в окружном направлении и по высоте лопатки течение, которое описывают уравнениями сохранения в сочетании с обобщенными полуэмпирическими зависимостями по учету источников гидравлических потерь, углов отставания потока и т.д. [19]. В лопаточных венцах турбомашин к источникам гидравлических потерь по проявлению вязких эффектов в уравнении Навье-Стокса необходимо учитывать перетекания в радиальных зазорах, нестационарные эффекты взаимодействия соседних лопаточных венцов, волновые и акустические явления, а в компрессорах также – диффузорный характер течения в межлопаточных каналах и др. Эти сведения в форме статистических данных надо использовать (дополнительной информацией) для замыкания системы уравнений.

Теория квазитрехмерного потока в турбомашине, предложенная Ву Чун Хуа [20], является основой большинства существующих расчетных методов решения обратных и прямых задач, используемых при создании и доводке турбомашин. Большинство расчетов двумерного течения на осесимметричных поверхностях тока  $S_1$  в стационарной постановке осуществляют решением системы уравнений Эйлера с использованием методов кривизны линий тока [21, 22], матричных методов [23], метода установления [24]. Для расчета осредненного в окружном направлении течения на меридиональной поверхности  $S_2$  используют методы особенностей [13, 14], крупных частиц

[25], интегральных соотношений, потенциала скорости [9, 26], характеристик [27], методы возмущений (для расчета скачков уплотнения), прогонки [8], а также методы, основанные на использовании функции тока [28], методы кривизны линий тока [29], и т.д., с использованием различных упрощений [24]. В матричных методах система уравнений Эйлера сводится к дифференциальному уравнению второго порядка в частных производных, а в методе кривизны линий тока – к решению нелинейного дифференциального уравнения первого порядка относительно меридиональной скорости [21, 24, 29]. Предположение о постоянстве полной энтальпии и энтропии в безвихревом потоке применяется в методах расчета с использованием потенциала скорости [26]; решение задачи Коши для уравнения Лапласа находят с помощью краевых задач Дирихле и Неймана [1-2].

Для аппроксимации исходных дифференциальных или интегральных уравнений системой алгебраических уравнений используют различные методы дискретизации [8]. Наиболее распространенными из них являются метод конечных объемов (МКО), метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), а также спектральные методы [8-10, 12, 30]. Решение разностных уравнений может быть проведено прямыми либо итерационными методами (в т.ч. многосеточными), с использованием дискретизации по времени (с применением явных, неявных либо явно-неявных схем), по пространству, с применением структурированных, неструктурированных либо гибридных сеток [8, 9]. В работе [31] представлена эффективная неявная конечно-разностная схема для численного интегрирования уравнений Эйлера в форме законов сохранения. Надежной и работоспособной для расчета сложных течений является разностная схема С.К. Годунова, получившая развитие в работе [32]. Эффективные разностные схемы для решения построены в работах А.А. Самарского [33], П. Роуча [34], Р. Мак-Кормака, и др.

Для учета проявления вязкости при моделировании течения с помощью уравнений Эйлера используют уравнения пограничного слоя [11] или применяют эмпирические зависимости для расчета сил сопротивления, воздействующих на поток [8, 21], а также учитывают турбулентное перемешивание потока по радиусу [28] с использованием обобщенных полуэмпирических соотношений для определения углов отставания потока [19]. В работе [22] для учета влияния вязкостных сил задают распределение коэффициента потерь полного давления вдоль линий тока. При расчете пограничного слоя

применяют метод интегральных соотношений, МКР и др. Однако они не всегда подтверждаются экспериментальными данными. Основной сложностью итерационного объединения расчетов вязкого течения и пограничного слоя является моделирование отрывных течений с сильным вязко-невязким взаимодействием. Оценка перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный при изменении параметров внешнего потока, требует учета влияния кривизны линий тока [29] и т.д. [8, 11]. Вместе с тем, включение интегрального метода расчета пограничного слоя, например [35], в алгоритм решения обратной задачи позволяет подсчитать толщину вытеснения, необходимую для уточнения конфигурации профиля лопатки, а также определить толщину потери импульса, с помощью которой можно более точно оценить профильные потери. Используя дополнительные данные о пограничном слое, можно оптимизировать заданное распределение скоростей с целью уменьшения потерь в решетке лопаточного венца.

Для расчета трехмерного вязкого турбулентного течения на сегодняшний день используют прямое численное моделирование (DNS), моделирование с помощью осредненных уравнений Навье-Стокса: по времени (RANS), по пространству (LES), гибридное моделирование (DES) [36]. Использование DNS при расчете турбулентных течений путем непосредственного численного решения трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса приводит к большой вычислительной трудоемкости моделирования, несмотря на использование мощных многопроцессорных суперкомпьютеров (TeraFLOPS, Blue Horizon, SGI Origin2000 и т.д.). В связи с этим результаты, полученные с помощью DNS, наряду с экспериментальными данными, пока лишь составляют основу для калибровки и тестирования полуэмпирических моделей турбулентности [10]. Применение метода моделирования крупных вихрей LES с пространственным осреднением по областям позволяет сократить машинное время [36]. Вместе с тем, учитывая малый размер вихрей вблизи ограничивающих поверхностей, требования к сеткам для LES приближаются к аналогичным требованиям для DNS. Кроме того, при использовании LES необходимо, как и в случае применения DNS, проведение трехмерных нестационарных расчетов на мелких сетках даже в тех случаях, когда целью исследований является определение только параметров осредненного течения. При расчете пристеночных течений с обширными отрывными зонами используют комбинированные RANS-LES модели, в частности, метод моде-

лирования отсоединенных вихрей DES [36, 37]. В этом случае более достоверно рассчитывают отсоединенные вихри в отрывных зонах, а вихревые структуры в области присоединенных пограничных слоев описывают RANS моделями в сочетании с полуэмпирическими моделями турбулентности. Методы решения осредненных уравнений Навье-Стокса используют различные подходы с применением явных, неявных, явно-неявных схем дискретизации [8]. Для решения осредненных уравнений используют МКЭ, МКР, МКО, спектральные методы и т.д. Решение разностных уравнений выполняют прямыми либо итерационными методами [10]. Перспективным направлением разработки разностных схем интегрирования уравнений может быть применение схем минимизации полной вариации (TVD) [38].

Распространенным способом моделирования турбулентных течений является использование осреднения высокочастотных пульсаций турбулентной скорости по Фавру-Рейнольдсу (RANS) [38]. Для этого существуют программные комплексы FlowER, Numeka, ANSYS CFX, Fluent, FlowVision, STAR-CD и др. Точность решения в каждом из них зависит от качества сетки, граничных условий, численного алгоритма, а также выбора полуэмпирической модели турбулентности по связи между тензором рейнольдсовых напряжений и параметрами осредненного потока. Несмотря на многообразие моделей турбулентности (дифференциальных, алгебраических, с алгебраическими моделями рейнольдсовых напряжений), они не могут претендовать на универсальность. Каждая из них имеет свою область применения, поэтому требуются дополнительные исследования по их тестированию [37, 38].

Программные комплексы расчета трехмерного вязкого турбулентного течения и соответствующие методы адаптированы под решение прямых задач. Вместе с тем, их применение для решения обратных задач требует существенных дополнительных методических приемов. Обратные задачи внутренней аэродинамики турбомашин представляют наиболее сложный класс задач, для точного решения которых методы пока отсутствуют. Существующие методы решения обратной задачи [17, 39, 40] и др. обычно являются коммерческой собственностью разработчиков и полностью не публикуются. Поэтому остается потребность разработки комплексных методов аэродинамических расчетов для решения обратной задачи с одновременной геометрической оптимизацией лопаточных венцов на основе существующих программных комплексов, построенных на решении прямых задач. Такой путь использо-

ван авторами [41] по ослаблению источников потерь в радиальном зазоре рабочих колес за счет парусности и «тангенциального» навала лопаток с уменьшением зазора, применения «управляемой диффузорности» межлопаточных каналов и других мероприятий, позволивших повысить КПД ступеней до значений 0,920,93 и коэффициенты напора до 0,270,3 с дозвуковым обтеканием. Кроме того, уточнены статистические зависимости Хоуэлла и Либлейна по углам отставания, коэффициентам потерь, запасам по срыву, используемые в методиках проектирования лопаточных венцов.

### Заключение

Приведена классификация основных методов аэродинамических расчетов, используемых при решении задач внутренней и внешней аэродинамики. На основе анализа развития гидроаэродинамики предложены пути реализации современных методов расчета вязких течений в практических задачах проектирования осевых компрессоров.

### Литература

1. Михлин С.Г. Курс математической физики [Текст] / С.Г. Михлин – М.: Наука, 1968 – 576 с.
2. Лаврентьев М.А. Проблемы гидродинамики и их математические модели [Текст] / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Наука, 1977. – 408 с.
3. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация [Текст] / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола. – М.: Наука, 1983. – 200 с.
4. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент (в математической физике, аэродинамике, теории упругости и дифракции волн) [Текст] / И.К. Лифанов – М.: ТОО «Янус», 1995 – 520 с.
5. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы [Текст] / И. Дьярмати – М.: Мир, 1974. – 304 с.
6. Степанов Г.Ю. Гидродинамика решеток турбомашин [Текст] / Г.Ю. Степанов – М.: Физматлит, 1962. – 512 с.
7. Аэродинамика турбин и компрессоров [Текст] / под ред. У.Р. Хауторна – М.: Мир, 1968. 742 с.
8. Макнэлли. Обзор методов расчета внутренних течений в применении к турбомашинам [Текст] / Макнэлли, Сокол // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Теоретические основы инженерных расчетов. – 1985. – №1. – С. 103-122.
9. Белоцерковский, О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред [Текст] / О.М. Белоцерковский. – М.: Физматлит, 1994. – 448 с.
10. Приходько А.А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене [Текст] / А.А. Приходько. – К.: Наук. думка, 2003. – 379 с.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
12. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т.2. [Текст] / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
13. Белоцерковский С.М. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью [Текст] / С.М. Белоцерковский, М.И. Ништ. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
14. Амброжевич А.В. Численное моделирование комплекса нестационарных газодинамических процессов в тепловых двигателях [Текст] / А.В. Амброжевич // Моногр. – Х.: ХГАДТУ, 1999. – 77 с.
15. Бенерджи П. Метод граничных элементов в прикладных науках [Текст] / П. Бенерджи, Р. Баттерфилд. – М.: Мир, 1984. – 494 с.
16. Крашаница Ю.А. Метод граничных интегральных уравнений в плоских задачах динамики вязкой жидкости [Текст] / Ю.А. Крашаница // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №5(92). – С. 43-46.
17. Субботович В. П. Комплексное теоретическое и экспериментальное решение задач аэродинамики проточных частей турбин : дис. ... д-р техн. наук : 05.05.16; защита 10.10.13, утв. 17.01.14 / Субботович Валерий Петрович. – Х., 2013. – 355 с.
18. Лю Г.Л. Единая теория гибридных задач для полностью трехмерного несжимаемого течения в рабочем колесе, основанная на вариационных принципах при переменной форме области [Текст] / Г.Л. Лю // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки. – 1986. №2. – С. 17-21.
19. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин [Текст] / К.В. Холщевников, О.Н. Емин, В.Т. Митрохин. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
20. Wu C.H. A general theory of 3-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial, radial and mixed flow types [Text] / C.H. Wu / Trans. ASME. – 1952. – №8. – P. 1363-1380.
21. Сироткин Я.А. Аэродинамический расчет лопаток осевых турбомашин [Текст] / Я.А. Сироткин. – М.: Машиностроение, 1972. – 448 с.
22. Сальников В.С. Метод расчета течения газа и несжимаемой жидкости в турбомашинах с помощью ЭЦВМ [Текст] / В.С. Сальников. – М.: ЦИАМ (Тех. отчет ЦИАМ №294). – 1967 – 31 с.
23. Denton J.D. Throughflow Calculation for Transonic Axial Flow Turbines [Text] / J.D. Denton // Transaction of the ASME, Journal of Engineering for power. – vol.100. – 1978 – P. 212-218.
24. Дорфман Л.А. Численные методы в газодинамике турбомашин [Текст] / Л.А. Дорфман. – Л.: Энергия. – 1979. – 270 с.
25. Белоцерковский О.М. Метод крупных частиц в газовой динамике [Текст] / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов // Вычислительный эксперимент. – М.: Наука, 1982. – 352 с.

26. Гостелову Дж. Аэродинамика решеток турбомашин [Текст]: пер. с англ. / Дж. Гостелову. – М.: Мир, 1987. – 385 с.
27. Аэрогидромеханика [Текст] / Е.Н. Бондарев, В.Т. Дубасов, Ю.А. Рыжов и др. – М.: Машиностроение, 1993. – 608 с.
28. Метод расчета двумерного течения в многоступенчатом осевом компрессоре [Текст] / Л.Г. Бойко, В.Н. Ершов, Г.А. Гирич, В.Н. Яневич // Изв. вузов. Машиностроение. – 1989. – №5. – С. 56-60.
29. Новак Метод кривизны линий тока в вычислительных задачах для потока жидкости [Текст] / Новак // Тр. амер. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки. – 1967. – №4. – С. 30-41.
30. Численное моделирование течений в турбомашинах [Текст] / С.Г. Черный, Д.В. Чирков и др. – Новосибирск.: Наука, 2006. – 202 с.
31. Бим Р.М. Неявная факторизованная разностная схема для уравнений Навье-Стокса течения сжимаемого газа [Текст] / Р.М. Бим, Р.Ф. Уорминг // Ракетная техника и космонавтика. – 1978. – №4. – С. 145-156.
32. Крайко А.Н. Некоторые вопросы построения численных алгоритмов для решения течений идеального газа [Текст] / А.Н. Крайко // Конструир. алгоритмов и решение задач мат. физики. – М.: ИПМ, 1987. – С. 33-55.
33. Самарский А.А. Разностные методы решения задач газовой динамики [Текст] / А.А. Самарский, Ю.П. Попов. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
34. Роуч П. Вычислительная гидродинамика [Текст]: пер. с англ. / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 618 с.
35. Сороколетов М.Ю. Исследование течения в компрессорных решетках отличающихся формой средней линии лопаток [Текст]: дис. канд. техн. наук 05.04.12; / Сороколетов Михаил Юрьевич. – М., 1994. – 252 с.
36. Солодов В.Г. Моделирование турбулентных течений. Расчет больших вихрей [Текст]: моногр. / В.Г. Солодов. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 168 с.
37. Волков К.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений [Текст] / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
38. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин [Текст]: моногр. / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорушенко, С.В. Ершов, А.В. Русанов, С.Д. Северин – Х.: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с.
39. Василенко С.Е. Метод проектирования решеток профилей с выровненным полем статического давления на выходе [Текст] / С.Е. Василенко, И.Б. Шкурихин // Гидроупругие колебания в машинах. – Институт машиноведения им. А.А. Благонравова. 1983. – №2. – С. 83-88.
40. De Vito L. A novel two-dimensional viscous inverse design method for turbomachinery blading [Text] / L. de Vito, R.A. Van den Braembussche // ASME Trans., Journal of Turbomachinery. – 2003. – Vol. 125, No 2. – P. 310-316.
41. Герасименко В.П. Комплексное аэродинамическое совершенствование компрессоров ГТД [Текст] / В.П. Герасименко, М.Ю. Шелковский // Вестник двигателестроения. – 2013. – №2. – С. 69-72.

Поступила в редакцию 12.06.2014

**В.П. Герасименко, М.Ю. Шелковский, С.А. Дмитрієв. Аеродинамічне вдосконалення осевого компресора**

*Розглянуто основні методи аеродинамічних розрахунків, які використовують при вирішенні завдань внутрішньої і зовнішньої аеродинаміки, сучасні напрями розвитку чисельних методів вирішення рівнянь Нав'є-Стокса. Приведено класифікацію за основними ознаками. Наведено програмні комплекси, які використовують для рішення усереднених за Фавром-Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса. Звернуто увагу на необхідність розробки комплексних методів аеродинамічних розрахунків, побудованих на вирішенні прямих задач, для вирішення зворотної задачі з одночасною геометричною оптимізацією лопаткових вінців на основі існуючих програмних комплексів.*

**Ключові слова:** турбомашини, лопатковий вінець, рівняння, турбулентність, тривимірне математичне моделювання.

**V.P. Gerasimenko, M.Y. Shelkovsky, S.A. Dmitriev. Aerodynamic improvement of axial compressor** *The basic methods of aerodynamic calculations, that used in internal and external aerodynamic, and modern numeral methods of Navier-Stokes equations calculations are considered. Classification is resulted on basic signs. Program complexes, in-use for Favre-Reynolds average Navier-Stokes calculations, are resulted. Paid regard to the necessary development of aerodynamic calculations methods, that are built on the of direct tasks decision, for the reverse task decision, with simultaneous geometrical optimization of blade vanes, based on modern existent program complexes.*

**Key words:** turbo-machine, blade row, equation, turbulence, three-dimensional mathematical design.