

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи

Лапин Василий Николаевич

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ  
НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В  
АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2006

Работа выполнена в Институте вычислительных технологий Сибирского  
отделения РАН.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент Черный Сергей Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Белолипецкий Виктор Михайлович  
доктор физико-математических наук,  
профессор Куропатенко Валентин Федорович

Ведущая организация: Институт гидродинамики  
им. М.А. Лаврентьева СО РАН

Защита состоится 27 декабря 2006 г. в 9 часов на заседании диссертационного  
совета Д 003.046.01. по защите диссертаций на соискание ученой степени  
доктора наук при Институте вычислительных технологий СО РАН по адресу  
630090, Новосибирск, проспект Академика М.А. Лаврентьева, 6  
(dsosvet@ict.nsc.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном зале  
вычислительной математики и информатики ГПНТБ СО РАН.

Автореферат разослан 24 ноября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Л.Б. Чубаров

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** В настоящее время повышение качества аэрогидродинамических установок является весьма *актуальной* задачей, необходимость решения которой обусловлена острой конкуренцией среди их производителей на мировом рынке, а также тенденцией роста требований к энергосбережению установок при их эксплуатации.

Аэрогидродинамическое проектирование установок производится путем перебора форм и выбора тех, которые при заданных режимах обеспечат наилучшие характеристики. При этом численное моделирование течений занимает определяющее место, так как позволяет оперативно отображать влияние вариации форм проточного тракта на характеристики. Поэтому совершенствование методов моделирования течений является, безусловно, *актуальной* задачей.

Значительное повышение производительности вычислительных систем обуславливает использование все более сложных моделей и постановок задач для адекватного описания течений, учета их особенностей, ранее недоступных для моделирования. Это обстоятельство обуславливает, в свою очередь, *актуальность* решения нестационарных задач о пульсациях давления в лопастной системе и отсасывающей трубе, которые приводят к большим гидродинамическим потерям, вибрации и шуму.

**Цель работы** заключается в совершенствовании и расширении возможностей численного метода решения трехмерных уравнений динамики несжимаемой жидкости, предложенного Ю.А. Грязиным, С.Г. Черным, С.В. Шаровым, П.А. Шашкиным<sup>1</sup>, путем повышения его точности и быстродействия, распространения на нестационарные пространственные задачи, решаемые в рамках различных постановок и моделей; установлении на основе результатов численного моделирования базовых свойств пространственных течений в турбомашинах и влияния на них определяющих параметров; решении практически важных задач о течениях в аэрогидродинамических установках.

**Научная новизна** изложенных в диссертационной работе результатов заключается в следующем. Создана оригинальная система моделей,

---

<sup>1</sup>Грязин Ю.А., Черный С.Г., Шаров С.В., Шашкин П.А. Об одном методе численного решения трехмерных задач динамики несжимаемой жидкости // Доклады академии наук – 1997 – Т. 353, № 4 – с. 478-483.

алгоритмов и программного инструментария, позволившая решать задачи численного моделирования пространственных невязких и турбулентных, стационарных и нестационарных течений в проточных трактах аэрогидродинамических установок.

На основе вычислительных экспериментов выявлены новые особенности течений в аэрогидродинамических установках, определены индивидуальные свойства математических моделей и алгоритмов, указаны области их применимости в зависимости от характера изучаемых процессов и режимов работы.

**Практическая значимость** диссертационной работы определяется возможностью использования ее результатов (моделей, алгоритмов и их программной реализации, результатов расчетов) при решении ряда прикладных задач численного моделирования течений в аэрогидродинамических установках. В том числе для расчета интегральных параметров режимов работы: мощность, КПД; динамических характеристик: шумов, нестационарных нагрузок на элементы установки и локальных характеристик потока: вихрей, кавитационных зон.

Результаты диссертационной работы используются в проектных исследованиях в филиале «Ленинградский металлический завод» концерна «Силовые машины».

**Обоснованность и достоверность** основных результатов, полученных в диссертации, основывается на строгом математическом описании используемых численных алгоритмов, детальных методических расчетах широко известных и рекомендуемых тестовых задач, сопоставлении результатов численных расчетов с данными экспериментов и результатами, полученными другими авторами.

#### **На защиту выносятся**

- численный метод расчета течений несжимаемой жидкости, полученный обобщением неявного метода конечных объемов и искусственной сжимаемости (Ю.А. Грязин, С.Г. Черный, С.В. Шаров, П.А. Шашкин), имеющий более высокую разрешающую способность и применимый для расчета пространственных невязких и турбулентных, стационарных и нестационарных течений;

- численные алгоритмы расчета турбулентных течений, обладающие однородностью и в пристеночной области;
- результаты решения задач в различных постановках о прецессии вихревого жгута, выявившие механизмы его формирования и область влияния на течение в проточном тракте;
- результаты решения ряда прикладных задач о течениях в аэрогидродинамических установках.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на Международной конференции «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика» (RDAMM-2001, Новосибирск, 2001), Конференции молодых ученых по математике, математическому моделированию и информатике (Новосибирск, 2001), Международной конференции «Вычислительные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании» (VTMM-2002, Алматы, Казахстан, 2002), Международной конференции молодых ученых по математическому моделированию и информатике (Новосибирск, 2002), Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (VMSPS-2003, Владимир, 2003), Международных конференциях «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (ВИТ, Казахстан, Усть-Каменогорск, 2003, Алматы, 2004), 12-й Международной конференции по методам Аэрофизических исследований, (ICMAR, Новосибирск, 2004), 11-м Международном симпозиуме по нестационарной аэродинамике, аэроакустике и аэроупругости турбомашин (Москва, 2006), обсуждались на семинарах в Институте вычислительных технологий СО РАН, Институте теоретической и прикладной механики СО РАН, Институте теплофизики СО РАН, Институте гидродинамики СО РАН.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикаций, в знаменателе – объем, принадлежащий лично автору) 1 монография (13/2.5 печ. л.), 1 статья в издании, рекомендованном ВАК для представления результатов докторских диссертаций (1/0.3 печ. л.), 3 – в международных рецензируемых журналах (4.2/1.5 печ. л.), 4 – в трудах международных и всероссийских конференций (2.2/0.8 печ. л.), 1 – в тезисах международных конференций (0.1/0.05 печ. л.).

**Личный вклад автора.** В работе [1] автор участвовал в постановке задач, конструировании численных алгоритмов решения основных уравнений, исследовании моделей турбулентности, им решены задачи о течениях в питательном насосе и вентиляторе. В публикации [2] автор участвовал в разработке двухслойной модели турбулентности, осуществлял ее программную реализацию и апробацию. В работе [3] автором реализован метод пристеночных функций для расчета турбулентных течений, им проведены вычислительные эксперименты. В публикациях [4-6] автору принадлежат конструирование и реализация алгоритмов решения нестационарных уравнений, обработка полученных результатов. В работе [7] автор участвовал в постановке задач, им проведены вычислительные эксперименты, и анализ полученных результатов. В публикациях [8-9] автору принадлежат концепция исследования, разработка программного инструментария, проведение расчетов, интерпретация результатов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Список литературы содержит 80 наименований. Общий объем диссертации составляет 140 страниц, включая 5 таблиц и 80 рисунков.

## **Содержание диссертации**

*Во введении* обосновывается актуальность работы, обсуждаются особенности изучаемого класса задач гидродинамики турбомашин, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, кратко излагается содержание диссертации по главам.

Анализ моделей турбулентности для различных задач и особенности их реализации представлены в работах И.А. Белова, В.К. Бобышева, О.Ф. Воропаевой, Б.Б. Илюшина, С.А. Исаева, В.А. Коробкова, Д.В. Красинского, Н.А. Кудрявцева, А.Ф. Курбацкого, В.В. Риса, Е.М. Смирнова, Г.Ю. Степанова, Н.Н. Федоровой, Г.Г. Черныха, P. Bradshaw, Y.S. Chen, H. Daiguji, J.H. Ferziger, В.Е. Launder, S.B. Pope, A. Ruprecht, A. Skotak и др., которые дают представление о современном состоянии и возможности использования моделей турбулентности.

Обсуждаются достоинства и недостатки двух подходов к описанию турбулентных течений: моделей турбулентности, основанных на уравнениях Рейнольдса, и метода крупных вихрей. Несмотря на более высокую разрешающую способность метода крупных вихрей, отмечается сложность его

применения для описания течений в реальных гидродинамических установках, из-за высоких требований к вычислительным ресурсам.

Проводится обзор работ, в которых рассматриваются вопросы моделирования пространственных течений в элементах турбомашин. Численный анализ особенностей таких течений представлен в работах Г.Ю. Степанова, В.И. Гнесина, Е.М. Смирнова, В.В. Риса, Г.И. Топажа, А.А. Жарковских, А.В. Захарова, Г.Л. Подвидза, Ф.Т. Заболотного, Г.А. Соколовского, С.Г. Черного, Н. Daiguji, A. Ruprecht, и др.

**В главе 1** описаны различные постановки задачи численного моделирования течений в проточном тракте аэрогидродинамических установок.

В § 1.1 приведены трехмерные уравнения Эйлера (невязкая модель) и осредненные либо по Рейнольдсу либо по объемам сеточных ячеек уравнения Навье-Стокса (турбулентная модель). Обе эти модели записаны в виде единой системы уравнений в дифференциальной форме

$$\mathbf{R}^t \mathbf{Q}_t + \mathbf{E}_{x_1} + \mathbf{G}_{x_2} + \mathbf{H}_{x_3} = \mathbf{F}, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{Q} = (p/\rho, u_1, u_2, u_3)^T, \quad \mathbf{R}^t = \text{diag}(0, 1, 1, 1), \quad \mathbf{F} = (0, f_1, f_2, f_3)^T,$$

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_1^2 + p/\rho - \tau_{11} \\ u_1 u_2 - \tau_{21} \\ u_1 u_3 - \tau_{31} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} u_2 \\ u_2 u_1 - \tau_{12} \\ u_2^2 + p/\rho - \tau_{22} \\ u_2 u_3 - \tau_{32} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} u_3 \\ u_3 u_1 - \tau_{13} \\ u_3 u_2 - \tau_{23} \\ u_3^2 + p/\rho - \tau_{33} \end{pmatrix},$$

$$\tau_{ij} = \nu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}.$$

Единая форма записи исходных систем уравнений облегчает построение вычислительных алгоритмов.

В § 1.2 рассмотрены модели замыкания для основных уравнений в случае турбулентного течения жидкости. В п. 1.2.2 приведена стандартная  $k-\epsilon$  модель для высоких чисел Рейнольдса. В п. 1.2.2 описана двухслойная  $k-\epsilon$ , модель, которая совпадает со стандартной в области развитого турбулентного течения и преобразуется в модель с одним уравнением в пристеночной области. В отличие от метода пристеночных функций, для применения которого необходимо, чтобы ближайший к стенке узел сетки

находился в логарифмическом подслое, модель с одним уравнением, применима и в логарифмическом и в вязком подслоях. Переключение между моделями осуществляется с помощью непрерывной управляющей функции  $\lambda(\text{Re}_y)$ . Для этого уравнения для скорости диссипации кинетической энергии турбулентности из модели с одним уравнением и из  $k-\varepsilon$  модели объединяются в одно выражение. Также с помощью  $\lambda$  осуществляется переход от одного модельного выражения к другому для турбулентной вязкости  $\nu_t$ . Достоинствами такого подхода являются то, что не требуется априори устанавливать границу применимости моделей и что при его реализации не нарушается однородность численного алгоритма. В методе крупных вихрей, изложенном в п. 1.2.3, все энергетически значимые масштабы турбулентности разрешаются напрямую, а остающийся вклад всех меньших, чем размер  $\Delta$  расчетной сетки (фильтра), масштабов учитывается в качестве «подсеточных» турбулентных напряжений. Для последних используется относительно простая модель замыкания Смагоринского.

В § 1.3 описаны законы геометрического, динамического и кинематического подобия, выполнение которых необходимо обеспечивать при моделировании течений в аэрогидродинамических установках.

В § 1.4 представлена сегментация области и постановка краевых условий на границах сегментов для моделей невязкого и турбулентного течений. Рассмотрены постановки задачи численного моделирования течений в турбомашинах: циклическая, приближение замороженного колеса и полная нестационарная постановка задачи. Циклическая постановка является наиболее экономичной – например, расчет течения в рабочем колесе гидротурбины занимает около трех минут на компьютере класса Pentium 4. В приближении замороженного колеса расчет ведется во всех межлопаточных и межлопастных каналах, что позволяет рассчитывать течение в спиральной камере, и учитывать окружающую неравномерность потока. Но некоторые особенности течения, например прецессия вихревого жгута за рабочим колесом гидротурбины, могут быть описаны только в полной нестационарной постановке.

**В главе 2** описываются методы решения основных уравнений и уравнений моделей турбулентности. Параграф 2.1 посвящен методу решения основных уравнений. Приведен метод искусственной сжимаемости, заключающийся в добавлении в уравнения неразрывности и импульсов



производных по псевдовремени  $\tau$  от давления и компонент скорости. Далее модифицированные уравнения записываются в форме интегральных законов сохранения для произвольного фиксированного объема  $V$

$$\left( \mathbf{R}^\tau \frac{\partial}{\partial \tau} + \mathbf{R}^t \frac{\partial}{\partial t} \right) \int_V \mathbf{Q} dV + \oint_{\partial V} \mathbf{K} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \mathbf{F} dV, \quad (2)$$

где

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \beta u_1 & \beta u_2 & \beta u_3 \\ u_1^2 + p/\rho - \tau_{11} & u_1 u_2 - \tau_{12} & u_1 u_3 - \tau_{13} \\ u_1 u_2 - \tau_{12} & u_2^2 + p/\rho - \tau_{22} & u_2 u_3 - \tau_{23} \\ u_1 u_3 - \tau_{13} & u_2 u_3 - \tau_{23} & u_3^2 + p/\rho - \tau_{33} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}^\tau = \text{diag}(1,1,1,1)$$

и дискретизируются

$$\left[ \mathbf{R}^\tau \frac{(\mathbf{Q}^{n+1})^{s+1} - (\mathbf{Q}^{n+1})^s}{\Delta \tau} + \mathbf{R}^t \frac{3(\mathbf{Q}^{n+1})^{s+1} - 4\mathbf{Q}^n + \mathbf{Q}^{n-1}}{2\Delta t} \right] V = (\mathbf{RHS}^{n+1})^{s+1}, \quad (3)$$

где  $\Delta \tau$  и  $\Delta t$  - шаг по псевдовремени и шаг по времени, соответственно;  $s$  - номер итерации по псевдовремени. Правая часть есть

$$\begin{aligned} \mathbf{RHS} = & -\left( (\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{i+1/2} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{i-1/2} + (\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{j+1/2} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{j-1/2} + \right. \\ & \left. + (\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{k+1/2} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{k-1/2} \right) + \mathbf{F}V \end{aligned}, \quad (4)$$

где  $(\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{i+1/2}$ ,  $(\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{j+1/2}$ ,  $(\mathbf{K} \cdot \mathbf{S})_{k+1/2}$  представляют собой разностные потоки через грани  $i+1/2$   $jk$ ,  $ij+1/2$   $k$ ,  $ijk+1/2$  ячейки с номером  $ijk$  и объемом  $V_{ijk}$ . Аппроксимация невязких потоков в работе соответствует схеме Чакравати-Ошера второго или третьего порядка точности. Предложены два способа расщепления матрицы Якоби невязкого потока  $\mathbf{A}$ . В первом расщепление проводится по собственным значениям

$$\mathbf{A}^\pm = \mathbf{R} \mathbf{D}^\pm \mathbf{L}, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{D} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4), \quad \lambda_{1,2} = U, \quad \lambda_{3,4} = U \pm \sqrt{U^2 + \beta \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}},$$

$\mathbf{D}^\pm$  - диагональные матрицы, содержащие только положительные или отрицательные собственные значения  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{R}$  - матрица, столбцы которой являются правыми собственными векторами матрицы  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{L}$  - матрица, строки которой являются левыми собственными векторами матрицы  $\mathbf{A}$ . Этот способ

обеспечивает минимальные значения диссипативных членов в численном алгоритме, но требует значительного количества арифметических операций при его реализации. Во втором способе используется спектральный радиус  $\mathbf{A}$

$$\mathbf{A}^{\pm} = 0.5(\mathbf{A} \pm \rho \mathbf{I}), \quad (6)$$

где

$$\rho = |U| + \sqrt{U^2 + \beta \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}}.$$

Данное расщепление вносит в численный алгоритм при том же порядке аппроксимации более высокий уровень схемной вязкости, но не требует обращения матриц 4x4 при реализации, поэтому более экономично.

Описана аппроксимация вязких разностных потоков, имеющая второй порядок точности. Также изложены линейризация дискретных уравнений по методу Ньютона и их приближенная LU-факторизация.

В § 2.2 предлагается метод решения уравнений моделей турбулентности. Для облегчения построения численных алгоритмов каждое из уравнений  $k - \epsilon$  модели записывается в обобщенном виде

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \phi u_j - v^* \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = H, \quad (7)$$

где вид членов  $\phi$ ,  $v^*$  и  $H$  конкретизируется для каждого уравнения. Для дискретизации уравнения, применяется неявный метод конечных объемов, невязкие разностные потоки на гранях ячейки определяются таким образом, чтобы результирующая разностная схема являлась противопотоковой схемой 2-го или 3-го порядков аппроксимации, проводится аппроксимация источниковых членов, в которой неявно аппроксимируются все слагаемые, имеющие отрицательные коэффициенты при искомым функциях. Это обеспечивает максимальную устойчивость численного алгоритма и возможность проведения расчетов в сложных областях на сильно неравномерных сетках. Описывается линейризация дискретного уравнения, его приближенная LU-факторизация а также метод решения уравнений двухслойной модели турбулентности.

В § 2.3 описана численная реализация краевых условий для моделей невязкого и турбулентного течения. Предлагается реализация метода пристеночных функций, в которой эмпирический закон стенки используется для расчета вязкого потока на стенке для основных уравнений, источниковых членов в уравнении для кинетической энергии и скорости ее диссипации  $\mathcal{E}$  в

ближайшей к стенке ячейке. Для расчета  $\varepsilon$  без нарушения однородности численного алгоритма уравнение для нее модифицируется в пристеночной области. В отличие от двухслойной модели, переход к области развитого турбулентного течения осуществляется с помощью кусочно-постоянной управляющей функции.

**В главе 3** рассматривается ряд тестовых двумерных и трехмерных задач, на которых изучаются основные свойства предложенного численного метода. Сравнение результатов проводится с известными точными решениями и экспериментальными данными. Поскольку базовый метод расчета невязких и ламинарных стационарных течений был достаточно хорошо изучен, в диссертации особое внимание уделено тестам, позволяющим продемонстрировать возможности метода при расчете нестационарных и турбулентных течений.

В §§ 3.1-3.2 приведены результаты расчетов турбулентных течений в плоском канале и в плоском канале за обратным уступом с использованием рассмотренных в § 1.2 моделей турбулентности. Цель исследований состояла в изучении и определении областей применимости данных моделей в зависимости от характера течения, а также в калибровке и уточнении эмпирических констант моделей. Определено оптимальное число перехода  $Re_y^* = 100$  в двухслойной модели. На задаче о течении в плоском канале за обратным уступом исследовано влияние способов расщепления на решение.

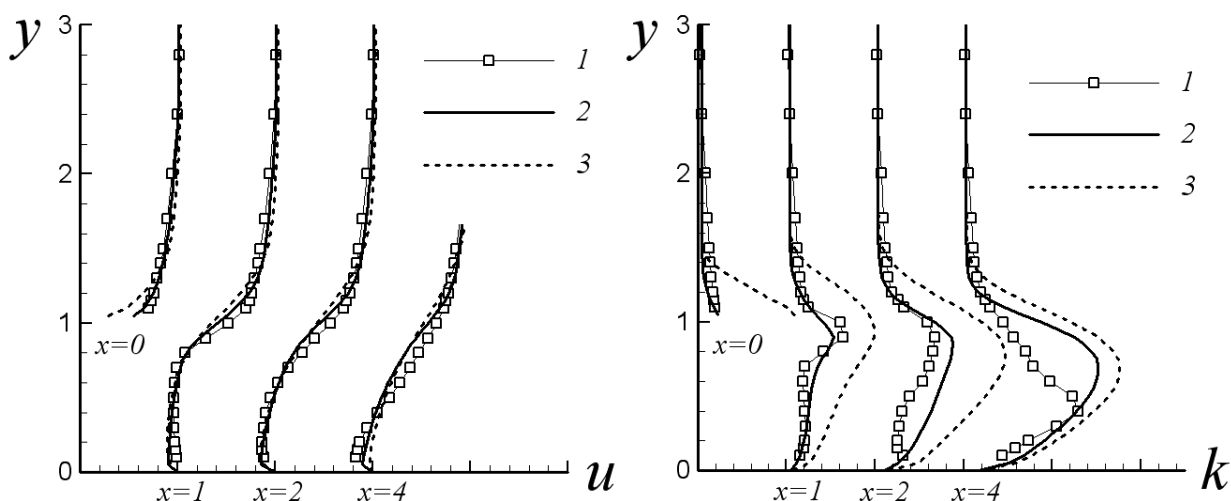


Рис. 1. Распределение продольной компоненты скорости (слева) и кинетической энергии турбулентности (справа).

1 – эксперимент, 2 – расчет с расщеплением (5), 3 – расчет с расщеплением (6)

На рис. 1 представлены распределения по высоте канала продольной компоненты скорости  $u$  и кинетической энергии турбулентности  $k$  в сечениях  $x = 0; 1; 2; 4$ . Видно, что расчет по схеме с расщеплением матрицы Якоби по собственным значениям (1.78) ближе к эксперименту, что объясняется меньшей схемной вязкостью, свойственной этому расщеплению.

В § 3.3 рассмотрена задача ламинарного нестационарного обтекания кругового цилиндра при  $Re=100$ . Проведенные сравнения количественных характеристик, полученных на основе предложенного алгоритма, с данными других авторов показали, что расчеты в рамках уравнений Навье-Стокса адекватно описывают нестационарные течения.

В § 3.4 в пространственной постановке решена задача о закрученном течении невязкой жидкости в круглой трубе. Проведено сравнение компонент скорости, полученных на основе предложенного алгоритма и на основе программного комплекса “Fluent”, с точными. Показано, что при использовании расщепления (5) настоящий алгоритм не уступает по точности комплексу “Fluent”, тогда как использование расщепления (6) несколько сглаживает решение.

**Глава 4** посвящена моделированию течений в проточных трактах аэродинамических установок.

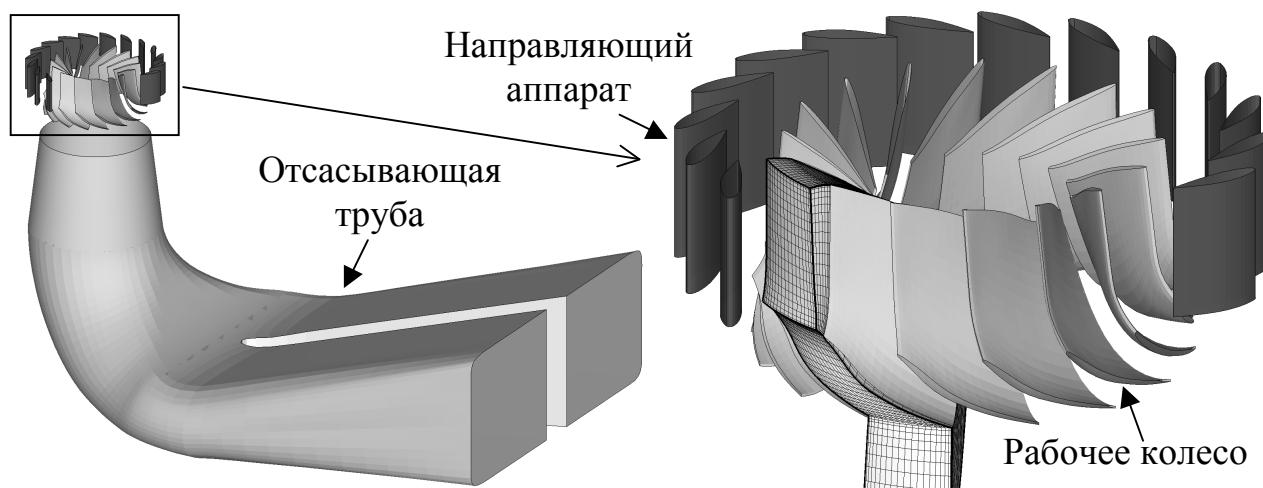


Рис. 2. Элементы радиально-осевой гидротурбины и сетка в рабочем колесе.

В § 4.1 в приближении  $k-\epsilon$  модели турбулентности проведено моделирование течений в элементах радиально-осевой гидротурбины (рис. 2): в рабочем колесе и отсасывающей трубе. В § 4.2 представлены результаты расчетов течения в направляющем аппарате, рабочем колесе и отсасывающей трубе (см. рис.2) на трех режимах работы: режиме номинальной мощности,

оптимального КПД и частичной загрузки. Моделирование проводилось в циклической постановке в приближении  $k - \varepsilon$  модели турбулентности. Показано хорошее совпадение полей скорости с экспериментальными данными. Проведен расчет потерь в проточном тракте гидротурбины. Размерные потери считались по двум различным формулам. Полученная в расчете зависимость потерь от расхода близка к экспериментальной (рис.3).

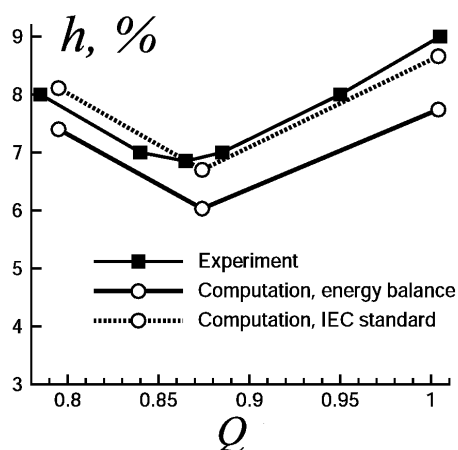


Рис. 3. Потери в проточном тракте гидротурбины на разных режимах работы

В § 4.3 в приближении замороженного колеса рассчитано стационарное течение воды с помощью уравнений Эйлера во всем проточном тракте ГЭС Платановрисси: спиральной камере, направляющем аппарате, рабочем колесе и отсасывающей трубе. В этом приближении положение колеса фиксируется относительно лопаток направляющего аппарата и отыскивается стационарное решение во всем проточном тракте. Вся область течения была разбита на 63 сегмента, общее количество ячеек сетки при этом составляло более одного миллиона. Показана окружная неравномерность течения при обтекании статорных колонн спиральной камеры и лопаток направляющего аппарата, которая является одним из факторов возникновения прецессии вихревого жгута за рабочим колесом в режиме неполной загрузки.

В § 4.4 с помощью уравнений Эйлера рассчитывается течение воды в проточном тракте ГЭС Платановрисси, но уже в полной нестационарной постановке. Были рассмотрены три важных режима работы гидротурбины Платановрисси: частичной загрузки, оптимального КПД и номинальной мощности. В радиально-осевой гидротурбине в режиме неполной загрузки за рабочим колесом возникает прецессирующий вихревой жгут. Эта прецессия так же была получена в расчете. Для того чтобы исследовать ее влияние, были проанализированы пульсации давления в различных точках проточного

тракта. Показано, оно распространяется на поле течения в колесе и даже выше по потоку и уменьшается вдали от вихря.

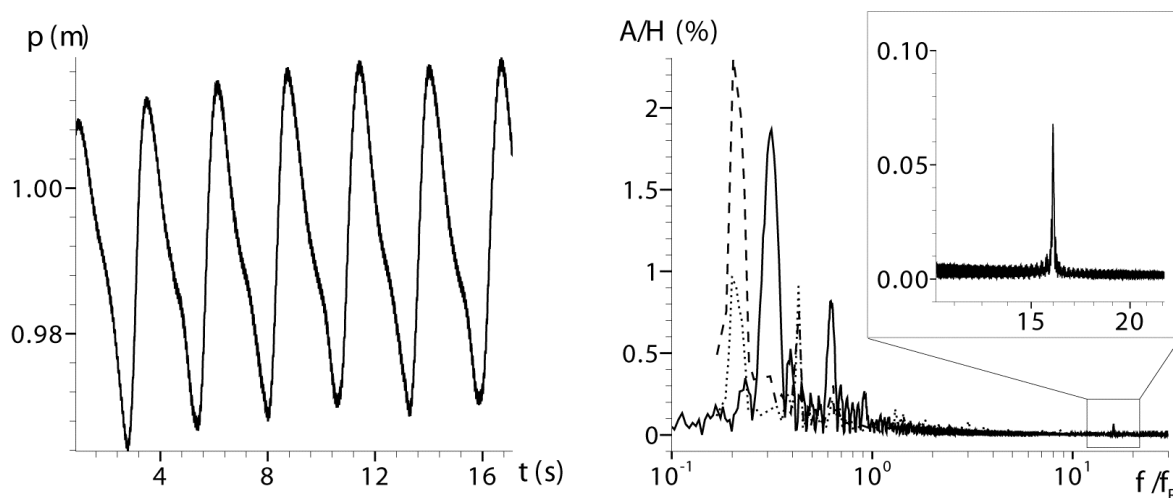


Рис. 4. Пульсации давления и их спектр: сплошная линия – расчет; пунктир и точки – эксперимент

Рис. 4 демонстрирует флуктуации давления в точке, где их величина максимальна, и их преобразование Фурье, полученные в эксперименте и расчетах. Горизонтальная ось правого рисунка есть отношение частоты пульсаций давления к  $f$  к частоте вращения колеса  $f_R$ . Вертикальная ось есть амплитуда пульсаций в процентах от полного напора. Высокий пик на графике частота-амплитуда соответствует частоте прецессии вихря, он немного сдвинут вправо из-за того, что открытие направляющего аппарата в расчетах было на 5% больше чем в эксперименте, но явно выраженная последовательность убывающих пиков, наблюдаемая в эксперименте, замечательно повторена в расчетах.

В § 4.5 проведено моделирование вихревого жгута в коническом диффузоре и отсасывающей трубе методом крупных вихрей. В коническом диффузоре проведен расчет течения при тех же параметрах в приближении RNG  $k-\epsilon$  модели турбулентности. В этом случае наблюдалась не прецессия вихревого жгута, а стационарное осесимметричное течение с рециркуляционными зонами.

В § 4.6 излагаются результаты моделирования течений в поворотно-лопастной гидротурбине. В п. 4.6.1 был проведен расчет течения во всем проточном тракте Волжской ГЭС в приближении замороженного колеса и уравнений Эйлера. Показано, что окружная неравномерность, значительная перед направляющим аппаратом, на выходе из него практически отсутствует,

это свидетельствуют о высокой степени достоверности предположения о цикличности течений в межлопастных каналах даже при небольшом числе лопастей. В п. 4.6.2 исследуется влияние протекания жидкости с рабочей на тыльную сторону лопасти через тонкий зазор в окрестности внешней ее кромки и корпуса, а также между внутренней кромкой и втулкой рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины ПЛ587а. Исследование проведено путем сравнения параметров течений, рассчитанных в циклической постановке в направляющем аппарате и рабочем колесе с учетом перетекания жидкости через зазор и без него. При расчетах применялись две модели несжимаемой жидкости: уравнения Эйлера и уравнения Рейнольдса с замыканием стандартной  $k-\epsilon$  моделью турбулентности. Оказалось, что влияние зазоров на интегральные характеристики течения независимо от используемых моделей и сеток составляет от 0.5% до 2%. Установлена локальная область пониженного давления за тыльной стороной лопасти, наличие которой свидетельствует о том, что протекание жидкости через зазор инициирует образование вихря.

В § 4.7 проведены расчеты течений в проточной части одной ступени водяного питательного насоса, используемого на ТЭЦ, при различных режимах его работы. В приближении уравнений Эйлера были рассчитаны течения при фиксированной частоте вращения рабочего колеса  $n$ , равной 2980 об/мин, и объемах подач (расходах)  $Q$ , изменяющихся от 40 до 200 м<sup>3</sup>/ч. Проанализирована структура потока, показано, что используемые в упрощенных моделях допущения о том, что поверхности тока являются поверхностями вращения, не выполняются.

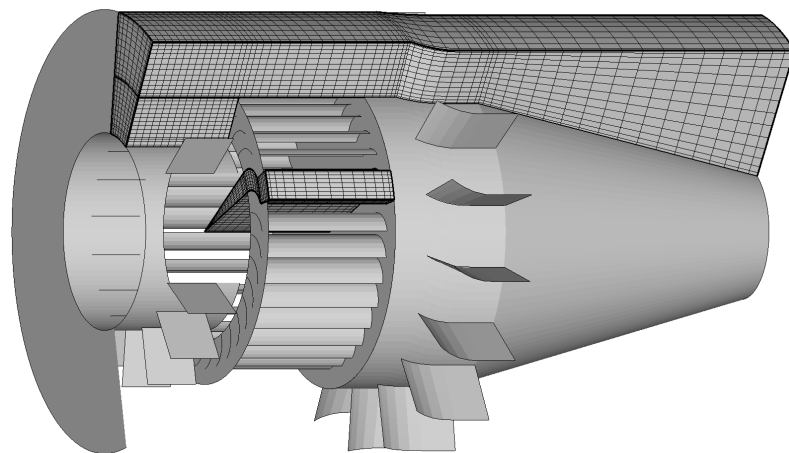


Рис. 5. Общий вид вентилятора и расчетные сетки.

В § 4.8 описываются результаты моделирования течений в оригинальном проектируемом вентиляторе с барабанным рабочим колесом и осевым выходом потока (рис. 5). В приближении уравнений Эйлера были рассчитаны течения в трех вариантах компоновки вентилятора при объемах подач  $Q$ , изменяющихся от 1000 до 2500 м<sup>3</sup>/ч. Проанализированы интегральные характеристики и структура течения, выбрана наиболее перспективная из рассмотренных компоновок.

В *заключении* сформулированы основные результаты работы.

### **Основные результаты работы**

1. Улучшен метод расчета течений несжимаемой жидкости (Ю.А. Грязин, С.Г. Черный, С.В. Шаров, П.А. Шашкин). Вместо, вносящего в схему излишнюю диссипацию, расщепления матрицы Якоби невязкого потока по ее спектральному радиусу применено расщепление по собственным значениям, обеспечивающее минимально необходимую величину схемной вязкости. Предложены и обоснованы различные способы задания давления на выходной границе, включающие в себя: условие радиального равновесия, вытекающее из основных уравнений и не вносящее возмущений на искусственных границах сегментации; условие его стратификации в поле силы тяжести; привлечение информации снизу по потоку в случае возвратных течений, позволяющее более корректно рассчитывать давление в случае противотока на выходной границе. Результаты решения ряда содержательных модельных и прикладных задач показали, что модифицированный численный метод обладает более высокой точностью.
2. Расширены возможности метода. В алгоритме расчета турбулентных течений улучшена реализация метода пристеночных функций в части учета эмпирического закона стенки при определении вязких потоков на стенке в основных уравнениях, вычислении члена генерации  $G$  в уравнении для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации  $\varepsilon$  в ближайшей к твердой стенке ячейке. Для расчета  $\varepsilon$  предложены два способа, заключающиеся в модификации  $\varepsilon$ -уравнения в пристеночной области. В первом – уравнение модифицируется только в ближайшей к стенке ячейке, второй – представляет собой двухслойную  $k-\varepsilon$  модель, в которой переход от алгебраического уравнения к дифференциальному



осуществляется с помощью непрерывной управляющей функции. Оба способа позволяют сохранить однородность численного алгоритма. Метод обобщен на задачи о нестационарных пространственных течениях. Для моделирования турбулентных нестационарных течений применен метод крупных вихрей.

3. Решена задача о прецессирующем вихревом жгуте в отдельно взятых конусе и отсасывающей трубе гидротурбины в приближениях  $k - \varepsilon$  модели и метода крупных вихрей. Установлено, что при задании осесимметричного входного потока прецессирующий вихревой жгут не моделируется в рамках  $k - \varepsilon$  модели, но хорошо передается методом крупных вихрей. Показано, что прецессия вызывает пульсации давления в потоке, затухающие к выходному сечению отсасывающей трубы.
4. Для определения механизмов формирования и эволюции прецессирующего вихревого жгута решена задача о нестационарном течении во всем проточном тракте гидротурбины в приближении численной модели невязкой жидкости. В данном приближении получен прецессирующий вихревой жгут при тех же режимах работы, что и в эксперименте. Установлено, что основными факторами его формирования являются окружная неравномерность потока, учитываемая этой постановкой и аппроксимационная вязкость схемы. Показано воздействие прецессии вихревого жгута на течение вверх по потоку: перед рабочим колесом присутствуют обусловленные ей пульсации давления.
5. Решены практически важные задачи о течениях в аэрогидродинамических установках:
  - впервые в России в трехмерной постановке выполнено численное моделирование течения в различных модификациях радиального вентилятора с осевым выходом потока;
  - проведены расчеты пространственных течений в питательном насосе, включая отводные, переводные и подводные каналы, показавшие, что предположение об осесимметричности потока, используемое при построении известных двумерных моделей течения, не выполняется из-за наличия вихрей в проточном тракте при всех режимах работы насоса;
  - на основе результатов проведенного численного моделирования течений в поворотно-лопастной гидротурбине в различных постановках установлена необходимость учета концевых зазоров в окрестностях внутренней и

внешней кромки лопасти для описания вызванных вихрями областей пониженного давления за кромками, важных для определения кавитационных характеристик турбины; обоснована возможность пренебрежения этими зазорами при расчете интегральных параметров гидротурбины (КПД, мощности, напора).

### **Список основных работ по теме диссертации**

#### ***монография***

1. Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н., Скороспелов В.А., Шаров С.В. Численное моделирование течений в турбомашинах – Новосибирск: Наука – 2006 – 202с.

#### ***публикация в издании, рекомендованном ВАК***

2. Кузьминов А.В., Лапин В.Н., Черный С.Г. Метод расчета турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе двухслойной  $k-\epsilon$  - модели // Вычислительные технологии – 2001 – Т. 6, № 5, – С. 73-86.

#### ***публикации в международных рецензируемых журналах***

3. Cherny S.G., Chirkov D.V., Lapin V.N., Skorospelov V.A., Turuk P.A., Numerical simulation of a turbulent flow in Francis hydroturbine // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modeling – 2006 – V. 21, № 5, – P. 425-446.

4. Cherny S. Chirkov D., Lapin V., Lobareva I., Sharov S., Skorospelov V. 3D Euler flow simulation in hydro turbines: unsteady analysis and automatic design // Springer Series: Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design – 2006 – V. 93, – P. 33-51.

5. Комар И.Ф., Лапин В.Н., Скороспелов В.А., Черный С.Г., Чирков Д.В., Шаров С.В. Проблемы моделирования течений в турбомашинах // Вестник КазНУ, серия математика, механика, информатика, – 2005 – № 2, – С. 27-52.

#### ***публикации в трудах международных конференций***

6. Cherny S.G., Chirkov D.V., Lapin V.N., Sharov S.V., Skorospelov V.A., Pylev I.M. Unsteady flow computation in hydro turbines using Euler equations // Turbomachines: Aeroelasticity, Aeroacoustics, and Unsteady Aerodynamics. Edited by V.A. Skibin, V.E. Saren, N.M. Savin, S.M. Frolov – TORUS PRESS Ltd. – 2006 – P. 356-369.

7. Лапин В.Н., Черный С.Г., Скороспелов В.А., Турук П.А. Проблемы моделирования течений в турбомашинах // *Вычислительные технологии* – 2004 – Т.9, Ч.3 – С. 57-66, по материалам международной конференции

«Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании».

8. Лапин В.Н., Скороспелов В.А., Турук П.А., Черный С.Г. Численное исследование влияния моделей жидкости и зазора между лопастями и корпусом рабочего колеса поворотной-лопастной гидротурбины на особенности и характеристики течения // Совм. вып. *Вычислительные технологии* – 2002 – Т.7, Ч. 3, *Вестник КазНУ* – 2002 – № 4 (32), по материалам Международной конференции ВТММ 2002 – С. 181-191.

*публикация в тезисах международных конференций*

9. Лапин В.Н., Черный С.Г. Численное моделирование нестационарных турбулентных течений в коническом диффузоре и отсасывающей трубе гидротурбины // Тезисы докладов двенадцатой международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Владимир, 30 июня - 5 июля 2003, М.: Изд-во МАИ – 2003 – Т. 2 – С. 411-412.

Лапин Василий Николаевич

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ  
НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В  
АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук