

6
А-61

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Г.В.Викторов

На правах рукописи

РЕШЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ
ДЛЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЛОПАСТНЫХ СИСТЕМ ГИДРОМАШИН
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ К РАСЧЕТУ И ИССЛЕДОВАНИЮ РАБОЧИХ КОЛЕС

(специальность № 05.193 - гидравлические машины)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва

1971

+

61
Работа выполнена на кафедре гидравлических машин Московского ордена Ленина Энергетического института.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Д.Я.Алексапольский,
доктор технических наук, профессор Г.С.Самойлович,
доктор технических наук, старш.научн.сотр. И.Э.Этинберг.

Ведущее предприятие - Ленинградский Металлический завод
им. XII съезда КПСС.

Автореферат разослан "10" марта 1971 г.

Защита диссертации состоится "2" апреля 1971 г.
на заседании Ученого Совета Энергомашиностроительного факультета Московского ордена Ленина Энергетического института.

Отзывы (в 2-х экземплярах) просим направить по адресу:
Москва, Е-250, Красноказарменная ул., 14, Совет МЭИ.

Дата защиты будет объявлена в газете "Вечерняя Москва".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета МЭИ

(Н.А.Кочемаров)

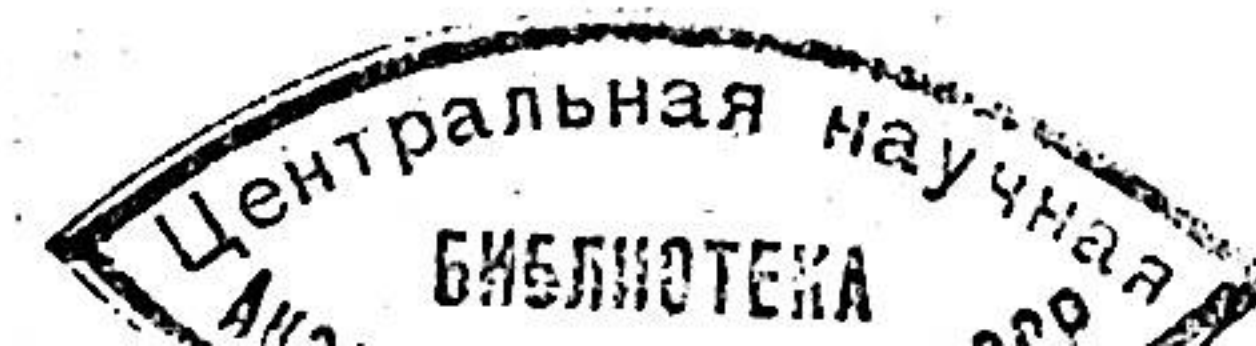
- I -

Прогресс в гидромашиностроении связан с улучшением энергетических и кавитационных показателей до уровня, превосходящего мировые достижения. Намечившаяся в гидротурбиностроении тенденция к повышению мощности агрегатов выдвигает ряд проблем в области конструирования, технологии и исследования рабочего процесса. Большое место в исследованиях последних лет занимает работа по созданию диагональных поворотнолопастных гидромашин: турбин, обратимых гидромашин и насосов. Разрешение этих и ряда других проблем гидромашиностроения возможно на основе разработки и применения новых методов теоретического и экспериментального исследования рабочего процесса. Рабочее колесо, являясь основным органом гидротурбины, оказывает решающее влияние на показатели машины в целом. Разработка и внедрение в практику исследований методов расчета течений в лопастных системах, учитывающих основные особенности этих течений, является одной из основных современных задач. Однако теоретические методы расчета течений в большой мере теряют свою эффективность без надлежащего обеспечения экспериментальными сведениями.

Итак, комплексное теоретическое и экспериментальное исследование течений в лопастных системах гидравлических машин является актуальной, современной задачей.

Диссертационная работа направлена на решение задачи расчета течения невязкой несжимаемой жидкости в произвольной лопастной системе.

Работа состоит из введения, восьми глав и заключения. Библиография содержит 226 наименований.



Во введении описана постановка приближенного решения трехмерной задачи. Приводится обзор работ, посвященных решению этой задачи. Показано, что достаточное обоснование имеет приближенная модель, где вводится два семейства поверхностей тока, на которых рассматриваются двумерные течения в слоях переменной толщины. Наибольшие возможности для практического применения дает модель, предусматривающая совместное решение задач осредненного осесимметричного течения и течения через решетку на осредненных поверхностях тока в слое переменной толщины. Именно в такой квазитрехмерной постановке рассмотрено в работе решение трехмерной задачи для лопастных систем гидромашин.

С целью приближенной оценки погрешности квазитрехмерного решения поставлена задача о дополнительном двумерном течении на поверхностях, ортогональных к осесимметричным поверхностям тока осредненного течения.

Для каждой из трех двумерных задач изложена постановка, в которой решаются эти задачи, даны дифференциальные уравнения течения и граничные условия.

В главе I изложено решение осесимметричной задачи для произвольного вихревого течения.

Осесимметричная задача в общем случае сводится к двумерному течению с дивергенцией и ротором, не равными нулю. С использованием скалярного и векторного потенциалов найдено интегральное уравнение для обобщенной потенциальной функции на границе области течения, по которой затем определяется функция тока в области течения.

Показано применение обобщенных аналитических функций

при решении осесимметричной задачи и получении интегральных уравнений для касательной составляющей скорости и обобщенной потенциальной функции. Уравнения приведены к виду, имеющему единственное решение. Рассмотренные уравнения имеют непрерывные ядра. Свободный член уравнений содержит двойной интеграл, определяемый по данным предыдущего приближения в процессе итерационного решения задачи.

Рассмотрены основные вопросы численного решения интегрального уравнения для обобщенной потенциальной функции, определения функции тока и составляющих скорости в области течения. Этот метод программируется для ЭВМ "Минск-22".

Изложен анализ качественного влияния формы лопастей рабочих колес на осредненное осесимметричное течение на примере рабочего колеса диагональной гидротурбины.

Предложенный метод пригоден для всех видов гидромашин, включая гидротрансформаторы. Расчет возможен также для осесимметричных течений при наличии возвратных токов.

Глава II посвящена решению прямой задачи для неплоской двумерной решетки в слое с произвольно изменяющейся толщиной.

Решение задачи найдено на некоторой вспомогательной плоскости, конформно связанной с осесимметричной поверхностью тока. Даны дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка для потенциальной функции и функции тока, а также система дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка для тех же функций. Уравнения относятся к классу эллиптических дифференциальных уравнений. Аналогичные уравнения встречаются в зада-

чах, связанных с потенциальным установившимся движением газа при дозвуковых режимах и в теории фильтрации.

В кратком обзоре указаны основные положения известных решений. Для расчета лопастных систем турбомашин в слое с произвольно изменяющейся толщиной применимы методы расчета каналов, которые в применении к слабо нагруженным профилям решеток гидромашин дают существенную погрешность, особенно в области кромок. Распространение имеют методы расчета решеток в слое, изменяющемся по какому-либо простейшему закону. При этом удается в ряде случаев найти решение в замкнутом или приближенном виде. Некоторые работы доведены до численных расчетов. В случае применения этих методов для слоя с произвольным законом изменения толщины появляется не оцениваемая по величине погрешность. В большинстве случаев в гидромашинах толщина слоя в пределах решетки рабочего колеса имеет минимум. В ряде работ учитывается изменение толщины слоя лишь в расходной составляющей без обоснования строгости такого подхода.

В реферируемой работе задача решается в постановке, свободной от каких-либо ограничений. Считается, что относительное течение в решетке является установившимся и безотрывным. Решетка с осесимметричной поверхности отображается на вспомогательную плоскость, где рассматривается обтекание круговой решетки от вихресточника, помещенного в центре.

Общее решение найдено в виде различных интегральных уравнений, для получения которых использовался аппарат обобщенных аналитических функций, впервые примененный для

построения периодических решений. Общее решение системы дифференциальных уравнений для слагающих скорости абсолютного течения получено в классе обобщенных аналитических функций. Найдено общее представление для комплексной скорости и обобщенного комплексного потенциала для квазиплоского течения в области круговой решетки. На основе этих выражений выведены интегральные уравнения для касательной составляющей скорости абсолютного потока на контуре профиля, для потенциальной функции, для относительной скорости на контуре профиля, для обобщенной потенциальной функции относительного течения.

В общее выражение для комплексной скорости входит двойной интеграл по бесконечной области одного периода решетки. Показана возможность ограничения области интегрирования ближайшей окрестностью решетки. Подынтегральное выражение двойного интеграла зависит от распределения расходной составляющей скорости, которая представляется в виде суммы среднего значения скорости и ее неравномерной части. Двойной интеграл, в который входит среднее значение скорости легко вычисляется.

Интегральное уравнение для касательной составляющей абсолютной скорости представляет собой интегральное уравнение типа Фредгольма второго рода с непрерывным ядром, которое имеет единственное решение. Свободный член уравнения, зависящий от неравномерности распределения расходной составляющей скорости, уточняется в процессе итерационного решения задачи. В первом приближении неравномерность не учитывается. Для оценки величины итерируемой части свобод-

ного члена расходная составляющая скорости представляется в виде ряда Фурье. Предполагается, что итерационный процесс сходится благодаря малой величине итерируемой части.

Намечены пути численного решения интегрального уравнения и определения гидродинамических параметров решетки: коэффициента прозрачности; параметра бесциркуляционного обтекания; активного радиуса. Показана зависимость циркуляции вокруг профиля и параметров решетки, расположенной на фиксированной поверхности тока, от параметров втулочной решетки. При этом учитываются свободные вихри, сходящие с лопастей при неравномерном распределении циркуляции по размаху лопасти.

Аналогична структура интегрального уравнения для относительной скорости.

Интегральное уравнение для потенциальной функции с непрерывным ядром имеет единственное решение. Свободный член уравнения уточняется в процессе итерационного решения задачи. Итерируемый член также приведен к виду, когда величина его становится малой и не оказывает заметного влияния на результат. Сделаны необходимые оценки, указывающие на хорошую сходимость итерационного процесса при решении уравнения для потенциальной функции.

Подробно исследовано также интегральное уравнение для обобщенной потенциальной функции относительного течения.

При численном решении задачи использовано интегральное уравнение для потенциальной функции. В работе приводится алгоритм численного решения, составленный примени-

тельно к ЭВМ "Минск-22".

Интегральное уравнение методом Боголюбова-Крылова сведено к приближенно его заменяющей системе из 60 линейных алгебраических уравнений. При аппроксимации функций толщины слоя и радиуса осесимметричной поверхности, задаваемых таблично, применяется метод наименьших квадратов. Определенные интегралы с переменным верхним пределом и криволинейные интегралы вычислялись с применением для каждого участка формулы трапеций. Разработан алгоритм для вычисления двойного интеграла итерируемого члена для численной оценки его веса. При вычислении производных для определения скорости используется интерполяционная формула Лагранжа для пяти точек.

Решение задачи запрограммировано для ЭВМ "Минск-22". Показана численными расчетами незначительная величина итерируемого члена, который в итоге опущен. Проверена точность программ отдельных блоков и всей программы в целом путем сравнения с точным решением обратной задачи, описанным в главе V, и известным решением прямой задачи для гиперболического слоя. На примере трех решеток показано удовлетворительное совпадение результатов. В итоге решения прямой задачи для решетки выдаются на печать распределение относительной скорости, кавитационного коэффициента по контуру профиля, гидродинамические параметры решетки, циркуляция и величина потерь.

Разработанный метод решения прямой задачи применен в массовых расчетах решеток гидромашин. Расчет одной решетки занимает 15 мин. машинного времени.

В главе III рассматривается ряд задач, представляющих практический интерес в гидромашиностроении, к решению которых может быть применен после некоторых обобщений и дополнений метод решения прямой задачи, изложенный в главе II.

Первая задача поставлена для решетки бипланов произвольного вида, применяемой в рабочих колесах гидротурбин, гидродинамических передач и других турбомашин. Решению прямой задачи для плоских решеток бипланов посвящен ряд работ, где излагаются как общие точные методы, так и приближенные решения, пригодные для тонких профилей.

Постановки задач для решеток бипланов и монопланов не имеют принципиальных различий. Общее решение получено в виде интегральных уравнений для касательной составляющей скорости и функции потенциала скорости. Уравнения приведены к виду, допускающему вычисление гидродинамических параметров и циркуляции. Функция свободного члена заметно усложнилась. Показан итерационный путь решения задачи.

При рассмотрении основных вопросов численного решения появляется ряд новых задач. Для обеспечения достаточной точности решения интегральное уравнение следует свести к системе $80+120$ линейных алгебраических уравнений при разбивке каждого из контуров биплана на $40+60$ интервалов. Для решения системы необходимо составить новую программу, учитывая возможности машины, например, "Минск-22". Обсуждается несколько путей. Предлагается итерационный метод, предусматривающий предварительное деление системы на две части. При решении каждой части системы отсутствует постоянный обмен информацией между оперативной памятью машины и

накопителем на магнитной ленте. Возможно также использование в итерационном процессе стандартной программы для решения системы из 60 линейных уравнений. В том случае, когда короткий профиль разбивается на 20 участков, а большой на 40, применима стандартная программа. Контроль точности решения устанавливается путем сопоставления с решением для решетки монопланов с четным числом профилей. Программа для решетки бипланов находится в стадии разработки.

Вторая задача связана с нестационарным обтеканием решеток. В ряде случаев поток, подводимый к лопастным системам гидромашин, не имеет осевой симметрии. Поток, формируемый спиральной камерой гидротурбины, имеет существенную неравномерность по окружности на входе в решетки статора, направляющего аппарата и рабочего колеса. При наличии изогнутой всасывающей трубы, подводящей воду к колесу осевого и диагонального насоса или обратимой гидромашин, также существует окружная неравномерность. Таким образом, на лопастях изменяется распределение скорости, давления, а следовательно, и гидравлическая сила, момент, циркуляция. Переменность циркуляции вызывает постоянный сход вихрей.

Задача решается в квазистатической постановке для произвольной решетки на осесимметричной поверхности в слое переменной толщины, вращающейся с постоянной угловой скоростью и обтекаемой потоком, не имеющим осевой симметрии на входе.

Распределение расходной составляющей скорости вдоль окружности во входном сечении в общем случае представляется рядом Фурье. В итоге задача сводится к построению тече-

ния на вспомогательной плоскости круговой решетки, обтекаемой от расположенных в центре вихреисточника и мультиполей всех порядков. Оценки показывают, что не следует удерживать мультиполи выше 6-8 порядков.

В работе анализируется общее выражение для комплексной скорости и возможности его упрощения. Скорость на профиле представляется в виде суммы осредненной части, одинаковой в соответствующих точках всех профилей, и неравномерной части, появляющейся благодаря неравномерности потока на входе. Интегральное уравнение для касательной составляющей скорости абсолютного потока отражает неравномерность, вызванную мультиполями, расположенными в центре решетки. "Вторичная" неравномерность, появляющаяся благодаря неравномерному распределению скорости в соответствующих точках профилей, не учитывается ввиду ее малой величины. Те же упрощения содержит и уравнение для потенциальной функции.

При численных расчетах на ЭВМ "Минск-22" используется уравнение для потенциальной функции φ . Распределение φ и скорости определяется для каждого из m профилей путем повторенного m раз решения интегрального уравнения. Вычисляется также циркуляция. Распределение расходной составляющей скорости на входе задается в табличном виде. Коэффициенты Фурье вычисляются по квадратурным формулам наивысшей алгебраической степени точности с постоянной весовой функцией. Число узлов квадратурной формулы принято равным 12. Приводится пример расчета решетки с $m=16$. В условиях неравномерности на входе расходной составляющей скорости 16% и окружной 7,5% установлено, что относительная скорость в

отдельных точках колеблется до 22%, а циркуляция вокруг профиля - до 24%. Решение на ЭВМ занимает около 2,5 часов.

Третья задача главы поставлена для произвольной двухрядной решетки, в которой одна из решеток равномерно вращается. Этот вопрос представляет практический интерес для выявления взаимного влияния лопастных систем гидромашин на распределение давления на лопастях, на гидравлические силы и моменты, энергетические и кавитационные качества. Взаимное влияние должно быть заметным при относительно небольшом расстоянии между решетками, что имеет место в некоторых системах гидротурбин, гидротрансформаторов и других турбомашинах.

Математически получение общего решения для двухрядной или многорядной решеток в квазистатической постановке не связано с новыми задачами по сравнению с однорядной решеткой. Легко обобщаются на многорядную решетку общие выражения для комплексной скорости, комплексного потенциала и потенциала скорости. Получаемые в итоге интегральные уравнения при точной постановке задачи включают интегрирование по всем контурам многорядной решетки. При численной реализации на ЭВМ такого решения возникают затруднения ввиду ограниченности памяти машины. В связи с этим найдено приближенное решение с учетом возможностей современной ЭВМ типа "Минск-22". Это решение представляет собой первую итерацию в процессе построения точного решения. В итоге задача в первом приближении сводится к решению интегрального уравнения, которое совпадает с аналогичным уравнением, полученным для решетки бипланов. Совпадают также и алгорит-

мы численного решения.

Глава IV посвящена постановке и решению задачи о дополнительном течении в лопастной системе на поверхностях E , ортогональных к осесимметричным поверхностям тока осредненного течения. Тем самым приближенно оценивается погрешность квазитрехмерного решения.

Решение задачи для дополнительного течения найдено на вспомогательной плоскости z , конформно связанной с E . Течение в плоскости z , ограниченной двумя концентрическими окружностями, является периодическим, как в круговой решетке. Поэтому в данном случае применим метод, разработанный в главе II. Рассматриваются уравнения неразрывности и вихря для абсолютного течения, разрешимые единственным образом при известном законе распределения вихря в области течения и условиях на границе. Решение найдено в классе обобщенных аналитических функций. Общее выражение для комплексной скорости служит для получения интегрального уравнения для абсолютной скорости. Указывается возможность некоторого упрощения свободного члена. Преимущество при численной реализации имеет интегральное уравнение для потенциальной функции, так как решение аналогичного уравнения запрограммировано для ЭВМ "Минск-22".

Показано, что комплексная скорость дополнительного течения в прямой бесконечной решетке выражается в интегральной форме через ξ -функцию Вейерштрасса, а комплексный потенциал — через ζ -функцию Вейерштрасса.

Проведены численные оценки уровня скоростей дополнительного течения на профилях прямой решетки, заключенной

между параллельными плоскостями. Образующая цилиндрической лопасти не перпендикулярна ограничивающим плоскостям. Для слабо нагруженных профилей учет скорости дополнительного течения не приводит к изменению скорости суммарного течения больше, чем на 1%.

Приближенные оценки для одной из лопастных систем диагональной турбины также показывают малый уровень скоростей дополнительного течения. В быстроходных радиально-осевых гидротурбинах относительная величина скорости такого течения возрастает. Предлагаемый метод позволяет определить скорость дополнительного течения в произвольной лопастной системе.

В главе V изложено решение обратной задачи для произвольной однорядной решетки на осесимметричной поверхности в слое переменной толщины. Применяется метод особенностей, широко распространенный в гидромашиностроении при профилировании новых лопастных систем. В кратком обзоре содержатся сведения относительно использования метода особенностей для построения течений в слое переменной толщины применительно к задачам фильтрации и теории решеток. Обсуждаются как приближенные методы, так и точные, связанные с построением периодических фундаментальных решений системы дифференциальных уравнений, описывающих течение в решетке в слое переменной толщины. Отмечается, что большинство работ носит приближенный характер и ограничивается решением частных задач без должной оценки погрешностей, связанных с применением этих решений для общих случаев.

В диссертации задача решается в самой общей постановке

на вспомогательной плоскости z в области прямой бесконечной решетки. Условия на границах заданы. Для получения единственного решения в последующем задача доопределяется.

Основным при решении обратной задачи методом особенностей является вопрос о существовании решения в смысле возможности получения замкнутых линий тока вокруг линий особенностей (скелетных линий). Во многих работах (во всех зарубежных) рассматриваются только необходимые условия замыкаемости. В тех работах, где обсуждаются также и достаточные условия, при практических расчетах для слоя постоянной толщины содержатся неточности. В реферируемой работе излагаются необходимые и достаточные условия замыкаемости профиля для решеток в постоянном и переменном слоях, полученные на основе выяснения картины течения в области входной кромки.

Общее выражение для комплексной скорости в плоскости z , представленное в классе обобщенных аналитических функций, содержит двойной интеграл по бесконечной области одного периода. Течение в области прямой решетки получается в результате суммирования плоскопараллельного течения, течения от решетки слоев вихреисточников, распределенных на скелетных линиях, и течения от распределенных в области источников. Выражение для комплексной скорости приведено к такому виду, когда величина двойного интеграла мала по сравнению с другими слагаемыми. Аналогичный двойной интеграл исследовался при решении прямой задачи.

Алгоритм, приведенный в работе, включает основные вопросы, связанные с вычислением слагаемых общего выражения

для комплексной скорости относительного течения. Относительная скорость определяется итерационным методом. При этом итерируемый член, зависящий от расходной составляющей скорости, мал, что подтверждено расчетами на ЭВМ. Вычисление криволинейных интегралов производится с помощью квадратурной формулы наивысшей алгебраической степени точности с весовой функцией Чебышева. Соответствующая квадратурная формула с постоянными коэффициентами получена Мелером. В формуле Мелера принято 11 узлов со сгущением к краям скелетной линии. При этом обеспечивается высокая точность вычисления интегралов. Ранее, при вычислении аналогичных интегралов применялись квадратурные формулы для 7 равноотстоящих узлов. Кубатурная формула, необходимая для вычисления итерируемого члена, строится путем повторного применения квадратурных формул Мелера. Подробно описан процесс выделения особенностей.

Алгоритм и программа для ЭВМ "Минск-22" проверены путем сопоставления результатов определения составляющих скорости с известными решениями. Итерируемый член настолько мал, что его можно опустить при проведении практических расчетов.

Решение задачи на ЭВМ для телесной решетки найдено при следующих данных: геометрии поверхности тока, координат входной и выходной кромок, циркуляции и расхода перед решеткой, циркуляции вокруг профиля, угловой скорости, числа лопастей, характера эпюры относительных скоростей на разреженной стороне профиля, закона изменения толщины профиля, общего закона распределения источников и вихрей на скелет-

ной линии. В процессе решения задачи определяются геометрия профилей решетки и распределение относительной скорости, давления и кавитационного коэффициента по контуру профиля. Приводятся основные расчетные выражения. Анализируются возможности обеспечения перетекания через скелетную линию.

Точность решения обратной задачи для решетки телесных профилей оценена путем сопоставления с решением прямой задачи, выполненным в ЦКТИ. При этом задавалось изменение толщины слоя по гиперболическому закону.

Метод решения обратной задачи, реализованный на ЭВМ "Минск-22", нашел широкое применение при проектировании новых лопастных систем. Машинное время расчета для одной решетки 5-7 мин.

Глава УІ посвящена решению обратной задачи для произвольной неплоской решетки бипланов в слое переменной толщины. Обобщается на более сложный случай метод, развитый в главе У. Постановка задачи имеет некоторые отличия. Отсутствует предварительное задание характера эшпы относительной скорости на разреженной стороне профиля, обоснованный выбор которой вызывает затруднения. При необоснованном задании эшпы задача не получает решения. Для решетки бипланов неопределенность возрастает. В данном случае задается закон изменения циркуляции вдоль меридианной проекции скелетной линии каждого из профилей биплана. Таким путем можно управлять распределением нагрузки на профилях, что в итоге проявится на кавитационных и энергетических качествах решетки. Кроме того, облегчается получение исходных

данных для осредненной осесимметричной задачи.

При решении задачи на первом этапе, связанном с получением тонкого профиля, вводится учет толщины профиля, что уменьшает число приближений для получения формы скелетной линии.

В остальном используются алгоритм и программа, полученные для решетки монопланов, обобщенные на более сложный случай решетки бипланов.

В работе приведено общее решение задачи, основные выражения для определения составляющих скорости.

Предлагается также новый путь решения обратной задачи, отличающийся от рассмотренного в главе У. При этом на первом этапе определяется форма скелетных линий из условия равенства относительной скорости перетекания в узловых точках заданным величинам. Расход перетекания оценивается приближенно. Закон распределения вихрей фиксируется по первому этапу. Функции распределения источников найдены из условия получения заданной толщины профиля в нескольких узловых точках. Затем определяется окончательное положение скелетной линии. Получены уравнения для контуров профилей, которые служат для вычисления любого количества координат, минуя стадию определения скоростей. Рассматриваются основные вопросы численного решения.

Численное решение задачи найдено на ЭВМ "Минск-22". Машинное время около 30 мин. Проверена точность. Приводятся примеры расчета.

В главе УІІ излагаются результаты практического применения разработанного метода решения обратной задачи к рас-

четам лопастных систем гидромашин, выполненным при участии и под руководством автора. Здесь не отражаются работы других организаций, где внедрен и применяется этот метод. Практическое применение данного метода, проходившее по этапам, началось в 1964 г. в связи с расчетом рабочих колес диагональных поворотнолопастных насосов. Затем была рассчитана серия рабочих колес диагональных турбин Д30. На первом этапе применялся ручной счет по упрощенному алгоритму. С 1967 г. расчеты рабочих колес диагональных турбин, насосов и обратимых гидромашин ведутся с помощью ЭВМ по полной программе.

Для всех рабочих колес, кроме Д60-4020, расчетный режим совпадает с оптимальным по заданию. Условия в контрольных сечениях перед и за колесом принимаются в соответствии с общими рекомендациями, существующими в турбинах и насосах. Характер распределения относительной скорости на разреженной стороне профиля турбинного колеса задается, исходя из условия получения достаточно выравненной эпюры кавитационного коэффициента. Густота решеток принимается с учетом существующего опыта и из условий получения возможно меньшего значения кавитационного коэффициента колеса. Поэтому в ряде случаев густота решеток превышает значения, которые имели место в аналогичных лопастных системах.

Рабочие колеса Д30-4312, Д30-4315 при испытании показали хорошее соответствие расчетного и оптимального режимов. КПД равен 89,7%, что заметно превосходит достигнутые ранее значения.

На примере колеса Д60-4020 показана методика расчета, предусматривающая получение лопастей с хорошими кавита-

ционными качествами. Рассмотрено влияние густоты, размеров меридианной проекции лопасти, формы профиля и его скелетной линии на распределение динамического разрежения. Обнаружена наибольшая кавитационная опасность периферийных профилей. На основании расчета предполагалось получить $\sigma = 0,235$. Испытания во ВНИИГидромаше показали в расчетном режиме $\sigma = 0,27$, $\eta = 90\%$. Приводится анализ результатов.

Рабочее колесо Д30-4313 профилировалось на условия получения $\sigma = 0,07$. Однако по расчету максимальные значения σ достигали 0,10. Испытания колеса показали его хорошие кавитационные качества, заметно превосходящие достигнутые ранее у других колес этой серии. Получено по испытаниям $\sigma = 0,07$. На примере данного колеса показана возможность снижения σ за счет увеличения густоты.

Рабочее колесо Д45-4201 испытано во ВНИИГидромаше. В расчетном режиме $\sigma = 0,09$, что точно совпадает с данными, полученными при профилировании. В оптимальном режиме гидравлический КПД достигает 92%.

Новый метод расчета решеток применялся также при профилировании лопастных систем рабочих колес диагональных поворотнолопастных насосов, исследование которых ведется автором с 1963 г. Всего рассчитано 6 рабочих колес. Испытания проведены для 21 варианта насоса. Максимальный КПД насоса достигает 90-91%. Кавитационный коэффициент быстроходности в оптимальном режиме в насосе Дп60-21 имеет величину 1140.

Проведенные исследования показывают достаточную эффективность разработанного метода. Как турбинные, так и

насосные колеса, рассчитанные данным методом имеют высокие энергетические и кавитационные качества, что позволяет рекомендовать его для широкого применения.

В главе УШ излагаются результаты применения метода решения прямой задачи к исследованию течений в лопастных системах гидромашин. Сравниваются некоторые интегральные характеристики машин, полученные экспериментальным и расчетным путями.

Вначале анализируется влияние функции изменения толщины слоя на гидродинамические характеристики решетки. Показано, что изменение толщины слоя сказывается только на параметре, определяющем бесциркуляционное обтекание решетки. Коэффициент прозрачности и активный радиус практически не зависят от изменения толщины слоя. Анализируется влияние как сильного, так и слабого изменения толщины слоя.

Целью расчетно-теоретического обследования лопастных систем являлось установление качественного и количественного соответствия теоретических и экспериментальных данных на примере диагональных турбин и обратимых гидромашин.

Для рабочего колеса ДЗО-4312 решена прямая задача для решеток на четырех поверхностях тока в четырех режимах работы турбины. Параметры внешних характеристик известны по испытаниям. В результате расчета определены гидродинамические параметры решеток, распределение кавитационного коэффициента σ_c и величина профильных потерь. Зависимости σ_c от режима по расчету и эксперименту качественно хорошо согласуются. Абсолютная величина σ_c по испытаниям получается меньше, чем по расчету. Зона, длиной l_c , в которой σ_c

по расчету превосходит соответствующее экспериментальное значение, практически не зависит от режима. Это указывает на наличие кавитационной зоны на лопасти в режиме, регистрируемом в качестве критического при кавитационных испытаниях. В рабочем колесе ДЗО-4312 эта область занимает около 11-12% от площади разреженной стороны лопасти.

Результаты теоретического определения профильных потерь для колеса ДЗО-4312 удовлетворительно согласуются с экспериментом.

Далее сравниваются гидродинамические параметры лопастной системы (активный радиус $\hat{R}_a^2$, параметр бесциркуляционного обтекания i_c), полученные путем расчета и из эксперимента. По результатам расчета отдельных решеток вычисляются средние интегральные величины $\hat{R}_a^2$ и i_c для трехмерной лопастной системы. При соответствующей обработке данных испытаний удается определить экспериментальные значения $\hat{R}_{a, \text{эксп}}^2$ и $i_{c, \text{эксп}}$. Для колеса ДЗО-4312 при $D_1 = 0,31$ м получено $B \cdot i_c = 2,65$, $\hat{R}_a^2 = 0,018 \text{ м}^2$; $B \cdot i_{c, \text{эксп}} = (2,59 \pm 2,61)$, $\hat{R}_{a, \text{эксп}}^2 = 0,0176 \text{ м}^2$. Коэффициент прозрачности исследованных решеток близок к нулю.

Аналогичное обследование проведено для колеса ДЗО-4322.

На основании расчетов, продолженных по турбинным характеристикам колеса, и сопоставления с экспериментальными данными вывод о возможности сравнительной оценки качества лопастных систем за счет проектирования по изложенным принципам.

Указанные турбинные обследования проводились для рабочих колес ДЗО-4312 и ДЗО-4322. Указанные турбинные характеристики (рис. 1-10) и статистика, приведенная в тексте и таблицах, относятся к

лучение сведений об условиях течения в решетках рабочего колеса в насосном и турбинном режимах, о гидродинамических параметрах решеток, о потерях и кавитационных качествах является одной из актуальных задач исследования обратимых гидромашин. Наибольший интерес представляют насосные режимы.

Для насосного режима ОД45-У-10 получено $\hat{R}_a^2 = 0,0315 \text{ м}^2$, $B_2 i_0 = -3,78$, $\hat{R}_{a_2}^2 = 0,0307 \text{ м}^2$, $B_2 i_{0_2} = -3,61$. В оптимальном режиме значение теоретического напора больше по расчету на 5%, чем по эксперименту. Исследована работа каждой из элементарных решеток рабочего колеса. Обнаружена существенная неравномерность распределения циркуляции по размаху лопасти в оптимальном режиме, что приводит к недогрузке втулочных профилей и перегрузке периферийных. В этом одна из причин низких энергетических качеств машины ОД45-У-10 в насосном режиме ($\eta_{max} = 84\%$).

Анализ кавитационных характеристик профилей показывает, что наиболее опасная зона находится в области входной кромки. На участке длиной l_k значения σ_k , полученные по расчету, превосходят соответствующие экспериментальные значения. Можно предполагать (стробоскопические наблюдения это подтверждают), что в этой области имеет место кавитация в режиме срыва внешних характеристик.

Как показали расчеты, профильные потери в оптимальном режиме имеют сравнительно небольшую величину (3,0-4,0)%. Низкий КПД в насосном режиме связан с применением неоптимального отвода.

Обследование колеса ОД45-У-10 в турбинном режиме было затруднено из-за отсутствия данных тарировки направляющего

аппарата, профили которого имели специфичную форму, характерную для обратимых гидромашин. Воспользоваться гидродинамической тарировкой гидротурбинных направляющих аппаратов можно было только для получения приближенных сведений. В связи с этим наблюдается заметная разница в параметрах i_0 и i_{0_2} . Соответствие по активному радиусу хорошее.

Оценивались расчетным путем кавитационные качества колеса в турбинном режиме. Они оказались существенно лучше, чем в насосном режиме. Кавитационные испытания в турбинном режиме не производились.

Уровень профильных потерь в турбинном режиме находится в пределах 2,5%. Низкий КПД в оптимальном режиме, равный 83%, может быть объяснен существенной неравномерностью распределения циркуляции по размаху лопасти, достигающей 31,4%. Это приводит к дополнительным вихревым потерям, а также к ухудшению работы отсасывающей трубы.

Применение метода решения прямой задачи к исследованию рабочего процесса обратной гидромашины показало его достаточную эффективность.

В заключение остановимся на основных результатах работы:

1. Рассмотрены три двумерные задачи, к которым приближенно сводится трехмерная задача. Для решения этих задач применен метод интегральных уравнений, достаточно эффективный в случае применения ЭВМ и обеспечивающий высокую точность результатов.

2. Получены различные интегральные уравнения для осредненного осесимметричного вихревого течения на основе

теории потенциала и обобщенных аналитических функций. Изложены основные положения алгоритма численного решения применительно к ЭВМ "Минск-22". Оценено влияние геометрии лопастной системы на осредненное осесимметричное течение. Предложенный метод позволяет строить течения при наличии возвратных токов.

3. Решена прямая задача для решетки на поверхности тока осредненного осесимметричного течения в слое с произвольно изменяющейся толщиной в постановке, свободной от каких-либо искусственных ограничений. Метод практически реализован с помощью ЭВМ "Минск-22".

4. Метод решения прямой задачи для решетки обобщен на некоторые более сложные задачи, представляющие практический интерес в гидромашиностроении.

Получено общее решение для решетки бипланов. В квазистатической постановке решена задача нестационарного обтекания вращающейся решетки при отсутствии осевой симметрии потока на входе. Численное решение найдено с помощью ЭВМ "Минск-22". В общем виде показано приближенное решение прямой задачи для произвольной двухрядной решетки, один ряд которой равномерно вращается.

5. Поставлена и в общем виде решена задача о дополнительном течении в трехмерной решетке, имеющей место на поверхностях, ортогональных к осредненным осесимметричным поверхностям тока. Проведены численные оценки, указывающие на приемлемую точность квазитрехмерного решения для диагональных гидромашин.

6. Решена обратная задача для телесной неплоской двухмерной решетки в слое с произвольно изменяющейся тол-

щиной в постановке, свободной от каких-либо искусственных ограничений. Численное решение выполнено при помощи ЭВМ "Минск-22".

7. Решена обратная задача для произвольной решетки бипланов, реализованная на ЭВМ "Минск-22".

8. Показаны результаты практического применения метода решения обратной задачи к расчету лопастей рабочих колес диагональных гидротурбин и диагональных поворотнлопастных насосов. При испытаниях получены высокие энергетические и кавитационные качества машин.

9. Рассмотрены некоторые пути практического применения метода решения прямой задачи к исследованию лопастных систем гидромашин на примере диагональных гидротурбин и обратимых гидромашин. Подтверждено качественное и количественное соответствие теоретических и экспериментальных данных.

10. Основные материалы теоретических разработок, а также программы для ЭВМ "Минск-22" переданы для практического применения гидротурбинным заводам и ряду научно-исследовательских организаций.

Материалы, относящиеся к теме диссертации, опубликованы автором в монографии, статьях и отчетах по научно-исследовательским работам:

1. Гидродинамическая теория решеток. М, "Высшая школа", 1969.
2. К задаче расчета решеток профилей в слое переменной толщины. Докл. НТК МЭИ, секц. Энергомаш., подсекц. гидромашин, изд. МЭИ, 1967, (совместно с Г.М. Моргуновым).

3. О применении обобщенной формулы Коши для ρ -аналитических функций при расчете решеток профилей в слое переменной толщины. Докл.НТК МЭИ, секц.Энергомаш., подсекц.гидромашин, изд.МЭИ, 1967 (совместно с Г.М.Моргуновым).
4. Разработка экспериментального диагонального насоса с поворотными лопастями. Докл.НТК МЭИ, секц.Энергомаш., подсекц.гидромашин, изд.МЭИ, 1967 (совместно с Р.А.Усмановым).
5. Решение прямой задачи для решетки на осесимметричной поверхности в переменном слое. М, Труды ВНИИГидромаш, вып.37, 1968.
6. Решетка распределенных вихреисточников в переменном слое. М, Труды ВНИИГидромаш, вып.38, 1968 (совместно с Г.М.Моргуновым).
7. Решение прямой задачи теории решеток в относительном течении. М, Труды ВНИИГидромаш, вып.38, 1968.
8. Решение обратной задачи решеток профилей на осесимметричных поверхностях тока в переменном слое. Изв.АН СССР, МЭГ, № 4, 1968 (совместно с Г.М.Моргуновым).
9. О существовании решения обратной задачи для решетки методом особенностей. Изв.ВУЗов, Энергетика, № 4, 1969.
10. Прямая решетка в слое переменной толщины (один частный случай обратной задачи). Энергомашиностроение, № 7, 1969.
11. Решение на ЭВМ прямой задачи для произвольной решетки на осесимметричной поверхности в переменном слое. Докл.НТК МЭИ, секц.Энергомаш., подсекц.гидромашин, изд.МЭИ, 1969 (совместно с И.В.Вучковой).
12. Решение прямой задачи для решетки при отсутствии осевой симметрии потока на входе. Докл.НТК МЭИ, секц.Энергомаш., подсекц.гидромашин, изд.МЭИ, 1969.
13. Приближенное решение прямой задачи для произвольной двухрядной решетки на осесимметричной поверхности в переменном слое. Докл.НТК МЭИ, секц.Энергомаш., подсекц.гидромашин, изд.МЭИ, 1969.

14. Осесимметричное невозмущенное течение в гидромашинах. Изв.ВУЗов, Машиностроение, № 8, 1969.
15. Расчет течения жидкости в произвольной решетке на осесимметричной поверхности тока в слое переменной толщины. Изв.АН СССР, МЭГ, № 5, 1969 (совместно с И.В.Вучковой).
16. Решетка бипланов в слое переменной толщины. М, Труды ВНИИГидромаш, вып.40, 1970.
17. Разработка метода расчета произвольных решеток лопастей рабочих колес гидротурбин с применением ЭВМ. Отчет МЭИ по НИР, № гос.регистр.68032476; 1968 (совместно с Г.М.Моргуновым).
18. Разработка методики расчета решеток в слое переменной толщины на ЭВМ "Минск-22". Отчет МЭИ по НИР, № гос.регистр.68032477, 1970 (совместно с И.В.Вучковой).
19. Разработка метода расчета лопастей рабочих колес диагональных гидротурбин. Отчет МЭИ по НИР, № гос.регистр.69033088, 1970 (совместно с А.Ф.Маковецким и Г.М.Моргуновым).
20. Разработка метода расчета решетки бипланов. Отчет МЭИ по НИР, № гос.регистр.69033084, 1970 (совместно с Г.М.Моргуновым).