

Научно-исследовательский институт горной механики  
им. М. М. Федорова

На правах рукописи

БЕЗЗУБКО Игорь Анатольевич

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАБОЧИХ КОЛЕС  
АВТОМАТИЧЕСКИ РЕГУЛИРУЕМЫХ ШАХТНЫХ  
ОСЕВЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк – 1995

Диссертация является рукописью

ДБ 51.5 7.7

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте  
горной механики им.М.М.Федорова.

Научный руководитель: лауреат Государственной премии СССР,  
доктор технических наук,  
профессор ПАК В.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор ЛЕВИН Е.М.

кандидат технических наук  
КЛЕПАКОВ И.В.

Выдающее предприятие: Донецкий государственный проектно-  
конструкторский и экспериментальный  
институт комплексной механизации  
шахт (Донтипроуглемаш).

Защита состоится «23» марта 1995 г. в 14 часов на заседании  
специализированного совета К 135.09.01 при НИИГМ им.М.М.Федорова  
по адресу: 340055 Донецк-55, пр. Театральный, 7,  
НИИГМ им.М.М.Федорова, актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической  
библиотеке института.

Автореферат разослан «23» февраля 1995 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
кандидат технических наук

Богатов И.В.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00777433 (V)

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Ритмичная и безопасная работа горнорудных предприятий в значительной степени зависит от надежности вентиляторных установок главного проветривания и их способности в обеспечении непрерывно и интенсивно изменяющихся потребных режимов проветривания. Эти установки являются крупнейшими потребителями энергии на горных предприятиях. Поэтому обеспечение надежности и эффективности их работы является первостепенной задачей.

Мировые тенденции и анализ отечественного опыта дает основания сделать вывод, что наиболее эффективный путь удовлетворения указанных требований состоит в применении высоконапорных одноступенчатых осевых вентиляторов с поворотными на ходу лопатками рабочих колес и с повышенной частотой вращения.

Такие вентиляторы наилучшим образом обеспечивают требуемые диапазоны подач, давлений и скорости их изменений. За счет быстрого и точного регулирования режимов работы вентиляторных установок достигается значительная экономия энергоресурсов, повышается безопасность горных работ. Одноступенчатое исполнение позволяет повысить надежность машины в целом, снизить материалоемкость, габариты и расходы на капитальное строительство.

Поскольку традиционно применяемые лопаточные системы, составленные из стандартных эмпирически отработанных профилей, практически исчерпали резервы повышения параметров и экономичности, для реализации указанных свойств вентиляторов на высоком техническом уровне требуется создание новых рабочих колес, обладающих высокой аэродинамической эффективностью, надежностью, простотой изготовления и обеспечивающих возможность реализации рациональной конструкции механизма одновременного поворота лопаток.

В этих условиях актуальной задачей является обобщение и дальнейшее развитие существующих и создание новых методов проектирования и расчета рациональных лопаточных систем.

**Объектом исследования** является лопаточная система шахтных осевых вентиляторов.

**Предметом исследования** являются особенности обтекания и силового нагружения лопаточных систем шахтных осевых вентиляторов и методы проектирования их рациональных конфигураций.

**Цель работы:** разработка принципов проектирования рабочих колес шахтных осевых вентиляторов с поворотными на ходу лопатками, обеспечивающих высокую аэродинамическую эффективность, простоту конструкции и повышение надежности работы при регулировании.

**Идея работы** заключается в совместном анализе аэродинамического обтекания идеальной жидкостью, развития пограничного слоя и силового нагружения лопаточной системы рабочего колеса при поиске ее рациональной конфигурации.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач использованы: аналитический метод исследования течения в многорядных лопаточных системах на базе гидродинамической теории решеток и методов пограничного слоя; метод расчета характеристик пространственного распределения масс совокупности тел; экспериментальные исследования аэродинамики вентиляторов на моделях.

**Научные положения, защищаемые в диссертационной работе, и новизна:**

- аналитический метод исследования аэродинамики рабочих колес, образующих решетки общего вида, позволяющий расчетным путем получить данные об обтекании и аэродинамической нагруженности лопаточной системы;

- впервые решена в общей постановке обратная аэродинамическая задача метода дискретных вихрей на базе методов Ньютона и наименьших квадратов в виде, позволяющем анализировать корректность расчетной модели;
- задача расчета центробежных сил и моментов, действующих на лопатку осевого вентилятора во вращении, сведена к расчету ее геометрических характеристик, для чего впервые получен метод расчета всех компонентов тензора коэффициентов пространственного распределения масс произвольного порядка и размерности для любых тел; алгоритм вычисления этих величин может быть использован для численного интегрирования функций по многомерным объемам сложной конфигурации;
- прямой и обратный метод пограничного слоя в постановке Ле Фолля модифицирован и применен для поиска оптимальных эйлеров скоростей как исходных данных для получения соответствующей конфигурации лопатки с помощью решения обратной аэродинамической задачи;
- разработан метод проектирования высокоэффективных рабочих колес автоматически регулируемых осевых вентиляторов с требуемым моментом относительно оси поворота лопатки, основанный на итерационном процессе совместного решения обратной задачи потенциального обтекания, прямого и обратного метода пограничного слоя и задачи расчета оптимальной конфигурации лопатки в смысле центробежной нагрузки;
- для нужд проектирования и изготовления разработана аналитическая модель задания конфигурации лопатки осевого вентилятора и, в том числе, найдено оригинальное описание телесного профиля, включающее стандартную форму как частный случай.

**Достоверность научных положений обоснована:**

- использованием фундаментальных положений метода пограничного слоя и гидродинамической теории решеток;

- применением теоретически и эмпирически обоснованных метода дискретных вихрей и вычислительных схем развития пограничного слоя;
- сведением задачи расчета центробежных сил и моментов, действующих на рабочие лопадки, к расчету коэффициентов пространственного распределения масс лопатки, а также построением общего метода расчета этих коэффициентов и соответствием их расчетных величин известным аналитическим и экспериментальным данным;
- хорошим соответствием результатов теоретических исследований аэродинамики новых лопаточных систем данным физических экспериментов, проведенных на моделях;
- сравнительными аэродинамическими испытаниями моделей вентиляторов с существующими рабочими колесами и созданными в соответствии с разработанными методами.

**Научное и практическое значение работы.** Предложенные принципы проектирования на базе разработанного комплекса взаимосвязанных методов аэродинамики и механики позволяют исследовать и создавать рабочие колеса шахтных осевых автоматически регулируемых вентиляторов с учетом разных сторон свойства их оптимальности.

Метод дискретных вихрей естественным образом распространен на обратную аэродинамическую задачу общего вида.

Разработан общий метод расчета центробежных нагрузок на лопадки на основе расчета величин коэффициентов пространственного распределения масс произвольных тел.

Для всех рассматриваемых методов разработаны алгоритмы и их программные реализации для персональных компьютеров типа РС XT/AT, что создало реальную базу для проектирования рабочих колес шахтных осевых автоматически регулируемых вентиляторов путем численного эксперимента на ЭВМ и тем самым ускорить этот процесс и

сократить до минимума объем дорогостоящих и продолжительных по времени физических экспериментов.

**Реализация результатов работы.** Разработанная лопатка для рабочего колеса, получившего обозначение РК-23, заложена в проекты шахтных осевых автоматически регулируемых вентиляторов ВОА-30, ВО-30 (Донгипроуглемаш) и ВО-21 (НИПКИГормаш). Два опытных образца ВО-21 изготовлены на экспериментальном заводе НИПКИГормаш и переданы заказчику ПО «Северокузбассуголь» для эксплуатации. Рабочее колесо РК-24 воплощено в проекте Донгипроуглемаш для одноступенчатого автоматически регулируемого вентилятора ВДО-28.5, который изготавливается Барнаульским котельным заводом ПО «Сибэнергомаш» для блоков 500 МВт.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены на заседаниях научно-технического семинара «Шахтные турбомашинны» и ученого совета НИИГМ им.М.М.Федорова (г. Донецк, 1988–1993 гг.), на научно-технической конференции «Вопросы развития стационарных установок угольных шахт» (г. Донецк, ДПИ, 1988 г.), на Всесоюзном научно-техническом семинаре «Повышение эффективности тягодутьевого оборудования для энергетики и машиностроения» (г. Красноярск, 1991 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 работ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, изложенных на 157 страницах машинописного текста, в том числе 17 рисунков, 3 таблицы, содержит список 73 использованных источников и 1 приложение.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Переход к одноступенчатому исполнению вентиляторов и повышенным оборотам ротора практически исключает возможность применения

стандартных рабочих лопаток, детально исследованных и отработанных, но исчерпавших резервы повышения параметров и эффективности. Кроме того, такие лопатки затрудняют реализацию автоматического регулирования невозможностью реверса разворотом их на большой угол, большими центробежными нагрузками, передаваемыми механизму поворота, относительно большим их количеством на рабочем колесе, что затрудняет размещение механизма поворота в стесненных условиях втулки и понижает его надежность.

Поэтому существует необходимость разработки новых лопаточных систем специально для рабочих колес шахтных осевых автоматически регулируемых вентиляторов, отвечающих указанным требованиям.

Для разработки таких схем необходим комплекс методов, охватывающих разнообразные стороны оптимальности рабочих колес осевых вентиляторов и реализующих принципы их рационального проектирования.

Таким образом, цель работы заключается в разработке принципов проектирования рабочих колес шахтных осевых вентиляторов с поворотными на ходу лопатками, обеспечивающих высокую аэродинамическую эффективность, простоту конструкции и повышение надежности работы при регулировании.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие основные задачи исследований:

- разработать надежный и эффективный метод анализа обтекания лопаточных систем, расчета их аэродинамических параметров и профилирования под требуемое расчетное задание (обратная аэродинамическая задача) на основе методов расчета течения вязкой несжимаемой жидкости;

- учесть вязкость рабочей среды на базе методов пограничного слоя с возможностью анализа качества эпюр скоростей на поверхности лопатки с точки зрения отсутствия отрыва и получения оптимальных распределений скорости в смысле минимума потерь для последующего применения обратной аэродинамической задачи для поиска соответствующей конфигурации лопатки;
- разработать общие методы расчета центробежных нагрузок на лопаточную систему рабочего колеса и достижения требуемых их значений за счет специального проектирования конфигурации лопаток с учетом аэродинамического качества;
- создать новые рабочие колеса на основе разработанных принципов проектирования и испытать их.

Для исследования обтекания лопаточных систем шахтных осевых вентиляторов в работе обоснована рациональность применения квазитрехмерных методов потенциального обтекания профилей невязкой несжимаемой жидкостью, исходная постановка которых основана на интегральных уравнениях, а в качестве численной реализации исходных интегральных уравнений целесообразность использования метода дискретных вихрей.

Применение метода дискретных вихрей обобщено на случай решеток общего вида, составленных из произвольного количества и сочетания тонких и телесных профилей. Основные соотношения для нормальных и касательных скоростей на контуре профилей имеют следующий вид:

$$\sum_{i=1}^m g_i F_{nii} = w_x^0 \sin e_j - w_y^0 \cos e_j, \quad (1)$$

$$\pm \frac{1}{2 \Delta s_j} g_j - \sum_{i=1}^m g_i F_{nji} = w_x^0 \cos e_j + w_y^0 \sin e_j. \quad (2)$$

Индекс  $i=1, 2, \dots, n$  определяет совокупность контрольных точек профилей периода решетки, в которых должны выполняться эти соотношения, т.е. систему уравнений. Суммирование по индексу  $i$  должно

выполняться для всех вихрей периода решетки, ибо все они без исключения вносят вклад в величину скорости в любой точке области обтекания, численно выражаемый левыми частями этих соотношений. Воздействие компонент  $w_x^0$  и  $w_y^0$  набегающего потока учитывают правые части уравнений. Коэффициенты  $F_{n||}$  и  $F_{n\perp}$ , зависящие от взаимного положения вихрей и контрольных точек, в работе формулируются таким образом, что автоматически учитывают фактическое обтекания решетки отклоненным ею же входным потоком. Такой подход позволяет применять единую схему расчета обтекания прямых и круговых решеток, уединенных групп профилей и кольцевых каналов.

При решении прямой аэродинамической задачи и перед каждой итерацией обратной входной поток и геометрия профилей решетки известны и, следовательно, коэффициенты  $F_{||}$  и углы наклона  $\varphi$  касательных к контуру в контрольных точках определены. Искомыми являются циркуляции дискретных вихрей  $\varphi_i$ .

Рекомендовано применение уравнений метода дискретных вихрей в размерном виде с учетом особенностей общепринятого представления расчетных параметров при проектировании аэродинамических схем осевых вентиляторов. Для установления связи безразмерных параметров вентилятора и циркуляций, получаемых в результате решения системы уравнений, предложен вариант уравнения Эйлера:

$$\varphi_r = 2 \frac{\Gamma U}{T U^2} \cdot \quad (3)$$

Тонкие профили, как правило, представляются уравнениями вида (1). В работе подробно рассмотрены особенности формирования уравнений метода дискретных вихрей для двух вариантов моделирования телесных профилей: в виде условий непроницаемости профиля (уравнения (1)) и по равенству нулю касательных скоростей внутри его замкнутого контура (уравнения (2)). При этом предложен простой и надежный способ вычис-

ления диагональных элементов матрицы второго варианта для раскрытия неопределенности вида  $0/0$ . Наличие телесных профилей в составе решетки придает формальную переопределенность системе уравнений метода дискретных вихрей, для устранения которой предложено использование метода наименьших квадратов в сочетании с различными формулировками гипотезы Чаплыгина-Жуковского, обеспечивающее единообразие подхода к расчету обтекания всех возможных видов решеток в отличие от применявшихся до сих пор более громоздких и менее обоснованных методов.

Рассмотрены различные способы формирования обратной аэродинамической задачи общего вида с возможностью поиска рациональной конфигурации лопаточной системы, обтекание профилей которой удовлетворяет: требованиям безударного входа или определенным углам атаки; заданным суммарным циркуляциям; требуемым эпюрам касательных скоростей на контуре. Учитывая возрастающее таким образом число уравнений системы, удовлетворить им только за счет циркуляций нельзя. Необходимо варьировать геометрические параметры решетки, чтобы добиться выполнения всех уравнений системы (точного или в смысле наименьших квадратов). Состав этих параметров определяется характером проектирования лопатки. Наряду с линейно входящими в систему компонентами  $g_j$ , они образуют общий вектор неизвестных задачи, ставшей по существу нелинейной ввиду исключительно такого вхождения геометрических параметров в коэффициенты матрицы и правые части системы уравнений.

Учитывая характер нелинейности системы уравнений обратной задачи, для ее решения предложен метод Ньютона, обеспечивающий высокую скорость сходимости (3...5 итераций). Предложенный способ формирования системы уравнений обратной задачи учитывает линейное вхождение искомых циркуляций дискретных вихрей так, что в результате шага ме-

тогда Ньютона эти величины вычисляются в явном виде, тогда как для варьируемых нелинейных параметров, определяющих конфигурацию решетки, находятся их приращения. Способ варьирования отдельных геометрических параметров обобщен на случай согласованного изменения произвольной их совокупности (поиск по выбранному направлению в подпространстве параметров). Для обеспечения единообразия подхода, компактности и простоты при достаточной точности метода предлагается замена производных матрицы Якоби конечными разностями.

Для решения переопределенной обратной задачи предложено совместное применение методов Ньютона в различных модификациях и наименьших квадратов. При анализе и решении возможных типов прямой и обратной задач метода дискретных вихрей наряду с так называемой нормальной системой предложено использовать развитые методы наименьших квадратов, основанные на QR-алгоритме и сингулярном разложении матрицы системы уравнений.

Для нужд проектирования и изготовления лопаток осевого вентилятора разработана аналитическая модель задания их конфигурации. Также найдено оригинальное описание телесного профиля, включающее стандартную форму как частный случай.

При проектировании рабочих колес традиционного типа с однорядными решетками стандартных профилей, для которых накоплен большой объем эмпирических данных о действительных аэродинамических характеристиках в условиях вязкого потока, в теоретическом анализе пограничного слоя нет необходимости, тогда как для специальных решеток, к числу которых относятся решетки рабочих колес со сдвоенными лопатками и полипланами, рекомендуемых в силу своих качеств для вентиляторов, регулируемых на ходу, это необходимо. Методы теории пограничного слоя дополняют расчеты обтекания тел идеальной жидкостью для получения информации о наличии отрыва потока с обтекаемой

поверхности, величинах внутреннего и поверхностного трения, толщинах вытеснения и потерях энергии. В свою очередь эта информация помогает уточнить модель невязкого обтекания и обеспечить ее корректность.

Предлагается использовать интегральные методы пограничного слоя, причем такие, которые применимы для высоконагруженных решеток компрессорного типа, характеризующихся большими положительными градиентами давления: Трукенбротта, Уайта, Ле Фолля.

Наиболее полно поставленным в данной работе задачам соответствует метод Ле Фолля. Он модифицирован для непосредственного решения прямой и обратной задач пограничного слоя, то есть для получения либо параметров пограничного слоя в плоскости  $L-X$  по известным эволютам скоростей, либо, наоборот, для нахождения распределения скоростей, соответствующего оптимальному развитию пограничного слоя и минимуму потерь давления. Прямую задачу пограничного слоя следует применять после прямой или обратной аэродинамической задачи, а обратную задачу пограничного слоя — перед обратной аэродинамической. Основные соотношения в работе представлены в виде, использующем непосредственно эволюту скоростей без дополнительных промежуточных величин:

$$dX - \text{Re } w_r E C_D (1 + 2M) dx = 0, \quad (4)$$

$$dL - \frac{M}{1 + 2M} dX - \frac{1}{w_r} dw_r = 0. \quad (5)$$

Данная система обобщена на случай расчета пограничного слоя за точкой отрыва, для чего принимается во внимание знак параметра  $L$ , а также рассмотрено ее поведение в окрестности  $L = 0$ .

Вопрос об оценке потерь давления в двояных лопатках и полипланнах, за исключением схемы "тандем", в литературе не освещен. Предлагается суммировать эти потери по рядам решетки, что дает достаточно

точные, но несколько заниженные величины для решетки с большим сближением рядов по отношению к ее шагу.

Оценки нагруженности решетки по критерию Либлейна, основанному на его классической корреляции для стандартных профилей, дает надежные результаты по отрыву и для многорядных решеток.

В работе рассмотрен вопрос расчета аэродинамических сил и моментов, действующих на лопатки осевого вентилятора. Кроме того, имеют место значительные по величине центробежные нагрузки. Важно уметь их рассчитывать, а для проектируемых рабочих колес сколько это возможно уменьшать (в пределах разумного компромисса с аэродинамическим совершенством лопаток).

Задача определения центробежных сил и моментов, действующих на лопатку осевого вентилятора во вращении, сводится к расчету определенных ее геометрических параметров, называемых коэффициентами пространственного распределения массы. Для этого телесные и листовые лопатки представляются как совокупности симплексов, то есть соответственно тетраэдров или пространственных треугольников заданной толщины.

Предложен общий метод расчета этих коэффициентов произвольного порядка и размерности. Вся совокупность коэффициентов пространственного распределения масс определенного порядка составляет тензор того же ранга, поэтому при расчетах этих характеристик для другого пространственного положения лопатки можно воспользоваться известными правилами преобразования тензоров.

Рассмотрено влияние различных геометрических параметров лопатки на компоненты центробежных сил и моментов и пути их уменьшения. В качестве наиболее эффективного решения этой проблемы предложен метод проектирования самоуравновешенных лопаточных систем, позво-

ляющей исключить использование контргрузов. Наиболее естественно и удобно этот метод применим к сдвоенным лопаткам.

Исходными данными в этом случае являются объемы лопастей  $V_1$  и  $V_2$ , а также их центральные моменты инерции  $J_{xx}^1, J_{xx}^2, J_{yy}^1, J_{yy}^2$  и  $J_{xy}^1, J_{xy}^2$ . Искомыми являются такие положения центров объемов этих тел  $x_1, y_1$  и  $x_2, y_2$ , чтобы общий центр масс двух лопастей лежал на оси поворота лопатки и момент центробежных сил относительно этой оси был нулевым для любых углов установки. В итоге получаем систему уравнений:

$$x_1^2 - y_1^2 = \frac{J_{yy}^s - J_{xx}^s}{V}, \quad (6)$$

$$x_1 y_1 = -\frac{J_{xy}^s}{V}, \quad (7)$$

где

$$V = \frac{V_1}{V_2} (V_1 + V_2), \quad J_{xx}^s = J_{xx}^1 + J_{xx}^2, \quad J_{yy}^s = J_{yy}^1 + J_{yy}^2, \quad J_{xy}^s = J_{xy}^1 + J_{xy}^2.$$

Отсюда непосредственно находим  $x_1$  и  $y_1$ , а  $x_2$  и  $y_2$  — из условия нулевого положения общего центра масс в плоскости  $xOy$ . В работе рассмотрен также более общий метод самоуравновешивания лопаток варьированием радиальных линий совмещения сечений лопастей.

Проектирование высокоэффективных лопаточных систем рабочих колес шахтных осевых автоматически регулируемых вентиляторов предлагается осуществлять в виде итерационного процесса последовательного решения обратной аэродинамической задачи, прямого и обратного метода пограничного слоя и оптимизации конфигурации лопатки в смысле центробежных нагрузок.

Предложенный алгоритм расчета коэффициентов может самостоятельно быть использован для расчетов геометрических характеристик произвольных тел в различных технических приложениях, а также для

численного интегрирования функций по многомерным объемам сложной конфигурации.

Описанные методы расчета в полном объеме реализованы в виде программ для персонального компьютера типа РС XT/AT, что позволяет процесс проектирования вентилятора на определенное задание свести к численному эксперименту на ЭВМ.

При проектировании реальных рабочих колес был задействован аппарат всех вышеизложенных методов.

Разработана аэродинамическая схема одноступенчатого вентилятора для рабочего колеса РК-23. По сравнению с достаточно совершенным в аэродинамическом отношении рабочим колесом РК-15 с обычными телесными лопатками, рассчитанными по методу ЦАГИ, рабочее колесо РК-23 не уступает ему по достигнутым аэродинамическим показателям, но имеет на 40% меньшую плотность лопаточных решеток и более простую конструкцию.

Достаточно высокое значение максимального статического КПД этой схемы, равное 0,82, получено на режиме, соответствующем коэффициентам подачи 0,225 и статического давления 0,494, что обеспечивает следующие номинальные величины натурной установки с вентилятором диаметром 2,1 м при  $n = 1000$  об/мин:  $P_s = 3600$  Па,  $Q = 86$  м<sup>3</sup>/с. Безразмерные регулировочные характеристики схемы по результатам эксперимента приведены на рис. 1.

На основе рабочего колеса со сдвоенными листовыми лопатками создана также высокоэффективная аэродинамическая схема для рабочего колеса РК-24. Вентилятор диаметром 2,85 м, выполненный по этой схеме, с предотрывным диффузором при частоте вращения ротора 980 об/мин на режиме максимума полного КПД, достигающего 0,9, обеспечивает подачу 248 м<sup>3</sup>/с при полном давлении 6000 Па. Аэродинамические

характеристики данной схемы для угла установки  $37^\circ$  (угол максимума КПД) приведены на рис. 2.

Рабочее колесо РК-23 заложено в проекты шахтных осевых автоматически регулируемых вентиляторов ВОА-30, ВО-30 (Донгипроуглемаш) и ВО-21 (НИПКИГормаш). Два опытных образца ВО-21 изготовлены на экспериментальном заводе НИПКИГормаш и переданы заказчику ПО «Северокузбассуголь» для эксплуатации. Рабочее колесо РК-24 воплощено в проекте Донгипроуглемаш для одноступенчатого автоматически регулируемого вентилятора ВДО-28.5, который изготавливается Барнаульским котельным заводом ПО «Сибэнергомаш» для блоков 500 МВт.

Экспериментальные исследования проводились на моделях вентиляторов диаметром 700 мм. В соответствии с ГОСТ 10921-74 использовалась установка с камерой для испытания вентиляторов на всасывание. При акустических измерениях использовалась аппаратура фирмы «Роботрон» (ГДР): конденсаторный микрофон МК-221, точный импульсный шумомер 00 023 со встроенными октавными и третьоктавными фильтрами. Лопатки моделей рабочих колес РК-23 и РК-24 были изготовлены из стеклопластика на основе нескольких слоев стеклоткани и эпоксидного связующего методом контактной выклейки. Толщина лопастей составила 2 мм. Координаты сечений для изготовления шаблонов были получены с помощью графических возможностей компьютерной программы проектирования лопаток вентиляторов, разработанной автором.

Получено практически полное совпадение рассчитанных по методу дискретных вихрей и экспериментально полученных зависимостей коэффициента теоретического давления от коэффициента подачи.

Аэродинамические испытания новых разработанных лопаточных систем показали их преимущества по аэродинамическим параметрам и эффективности по сравнению с лучшими существующими схемами.

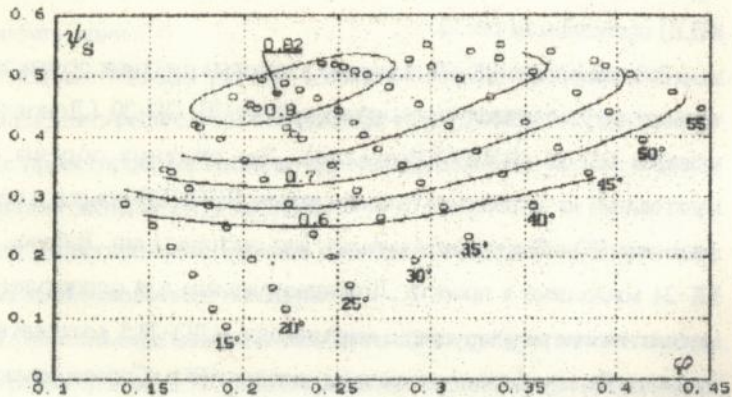


Рис. 1. Регулировочные характеристики модели РК-23.

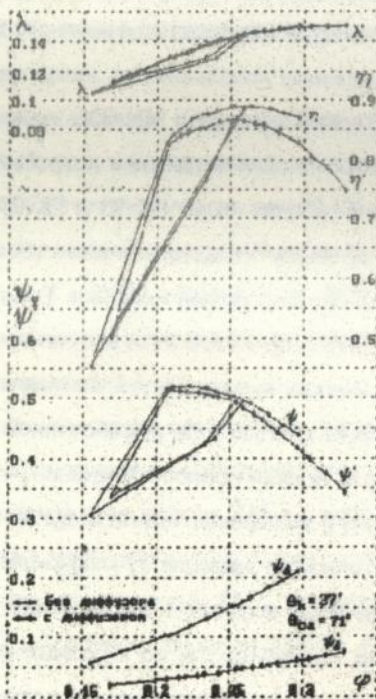


Рис. 2. Аэродинамические характеристики модели РК-24.

Акустические испытания новых разработанных лопаточных систем показали несущественные отличия их шумовых характеристик от соответствующих для существующих аэродинамических схем.

Вследствие сокращения количества узлов поворота и компенсации центробежного момента за счет специального проектирования системы сдвоенных лопаток обеспечена возможность предельного упрощения конструкции рабочего колеса с механизмом поворота лопаток на ходу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача, состоящая в создании комплекса взаимосвязанных методов аэродинамики и механики для реализации принципов рационального проектирования и исследования рабочих колес шахтных осевых вентиляторов с поворотными на ходу лопатками, что обеспечивает их высокую аэродинамическую эффективность, простоту конструкции и повышение надежности работы при регулировании.

Основные результаты и выводы заключаются в следующем:

1. В работе получил дальнейшее развитие и обобщение метод дискретных вихрей применительно к исследованию аэродинамики рабочих колес осевых вентиляторов, лопаточные системы которых моделируются решетками общего вида, составленными из произвольного количества и сочетания тонких и телесных профилей. Предложен метод, который обеспечивает единообразие подхода к расчету обтекания таких решеток и позволяет анализировать корректность расчетной модели. Метод дискретных вихрей формулируется с учетом особенностей общепринятого представления расчетных параметров осевых вентиляторов на основе предложенного варианта уравнения Эйлера.

2. На базе методов Ньютона и наименьших квадратов впервые решена в общей постановке обратная аэродинамическая задача метода дискрет

ных вихрей с возможностью поиска рациональной конфигурации лопаточной системы произвольного типа, обтекание профилей которой удовлетворяет: требованиям безударного входа или определенным углам атаки; заданным суммарным циркуляциям; требуемым эвпорам касательных скоростей на контуре. Способ варьирования отдельных геометрических параметров обобщен на случай согласованного изменения произвольной их совокупности. Метод обеспечивает высокую скорость сходимости итераций и единообразие подхода к решению прямой и обратной задач.

3. Учет вязкости рабочей среды предложено осуществлять на основе интегральных методов пограничного слоя, применимых к лопаточным системам осевых вентиляторов, которые характеризуются большими положительными градиентами давления. С этой целью модифицированы и применены прямой и обратный метод пограничного слоя в постановке Ле Фолля с возможностью анализа качества эвпор скоростей с точки зрения отсутствия отрыва и получения оптимальных распределений скорости в смысле минимума потерь для последующего поиска соответствующей конфигурации лопатки.

4. Задача расчета центробежных сил и моментов, действующих на лопатку осевого вентилятора во вращении, сведена к расчету ее геометрических характеристик, для чего впервые получен метод расчета всех компонентов тензора коэффициентов пространственного распределения масс произвольного порядка и размерности для любых тел. Алгоритм вычисления этих величин может быть использован для численного интегрирования функций по многомерным объемам сложной конфигурации.

5. Рассмотрено влияние различных геометрических параметров лопатки на компоненты центробежных сил и моментов и пути их уменьшения. В качестве наиболее эффективного решения этой проблемы предложен метод проектирования самоуравновешенных лопаточных систем, позволяющий исключить использование контргрузов. Наиболее ес-

тественно и удобно этот метод применим к двоянным лопаткам, получающим все большее применение в шахтных осевых вентиляторах главного проветривания, а также их обобщению — полипланам.

6. Проектирование высокоэффективных лопаточных систем рабочих колес шахтных осевых автоматически регулируемых вентиляторов предлагается осуществлять в виде итерационного процесса последовательного решения обратной аэродинамической задачи, прямого и обратного метода пограничного слоя в постановке Ле Фолля и оптимизации конфигурации лопатки в смысле центробежных нагрузок.

7. Для всех рассматриваемых методов разработаны алгоритмы и их программные реализации для персональных компьютеров типа РС XT/AT, что позволяет свести процесс проектирования вентилятора на определенное задание к численному эксперименту на ЭВМ при минимальных объемах физических экспериментов. Для нужд проектирования и изготовления разработана аналитическая модель задания конфигурации лопатки осевого вентилятора.

8. На основе предложенных принципов проектирования разработаны лопатки для рабочих колес, получивших обозначения РК-23 и РК-24, которые были заложены в проекты осевых автоматически регулируемых вентиляторов ВОА-30, ВО-30, ВО-21 и ВДО-28.5; экспериментальные образцы которых изготовлены и переданы в эксплуатацию. Аэродинамические и акустические испытания новых разработанных лопаточных систем показали их преимущества по аэродинамическим параметрам, шумовым характеристикам и эффективности по сравнению с лучшими существующими схемами. Вследствие сокращения количества узлов поворота и компенсации центробежного момента за счет специального проектирования системы двоянных лопаток была обеспечена возможность предельного упрощения конструкции рабочего колеса с механизмом поворота лопаток на ходу.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Руденко В.А., Беззубко И.А. Решение обратной задачи аэродинамического расчета рабочих колес осевых вентиляторов с многорядными лопаточными решетками // Стационарное оборудование шахт: Сб.науч.трудов /ВНИИГМ им.М.М.Федорова. - Донецк, 1987.- С.151-156.

2. Беззубко И.А., Руденко В.А. Применение метода дискретных вихрей к расчету многорядных гидродинамических решеток телесных профилей // Проблемные задачи совершенствования стационарных шахтных установок: Сб.науч.трудов /ВНИИГМ им.М.М.Федорова. - Донецк, 1988.- С.127-136.

3. Руденко В.А., Беззубко И.А. Прямой и обратный аэродинамический расчет круговых вращающихся многорядных решеток профилей произвольной формы методом дискретных вихрей //Прогрессивное оборудование шахтных стационарных установок: Сб.науч.трудов /ВНИИГМ им.М.М.Федорова. - Донецк, 1989.- С.144-153.

4. Беззубко И.А. Расчет центробежных сил и моментов, действующих на рабочие лопатки осевых вентиляторов // Прогрессивное оборудование шахтных стационарных установок: Сб.науч.трудов /ВНИИГМ им.М.М.Федорова. - Донецк, 1989.- С.153-164.

5. Руденко В.А., Беззубко И.А. Разработка базовой аэродинамической схемы шахтного осевого вентилятора ВО-21 // Горная механика: Сб.науч.трудов /НИИГМ им.М.М.Федорова. - Вып.1, часть 1.- Донецк, 1991.- С.250-260.

6. Беззубко И.А. Аналитическое описание профилей для лопаток шахтных осевых вентиляторов // Горная механика: Сб.науч.трудов /НИИГМ им.М.М.Федорова. - Вып.1, часть 1.- Донецк, 1991.- С.260-270.

7. Беззубко И.А. Проблемы снижения величин центробежных нагрузок, действующих на лопатки осевых вентиляторов и механизм их пово-

рота на ходу // Горная механика: Сб. науч. трудов /НИИГМ им.М.М.Федорова.- Вып.2.- Донецк, 1992.- С.112-120.

8. Беззубко И.А. Метод расчета коэффициентов пространственного распределения массы лопатки осевого вентилятора // Горная механика: Сб. науч. трудов /НИИГМ им. М.М.Федорова.- Вып.2.- Донецк, 1992.- С.121-127.

9. Беззубко И.А., Руденко В.А. Формирование систем уравнений прямой и обратной задач метода дискретных вихрей и способы их решения // Горная механика: Сб. науч. трудов /НИИГМ им.М.М.Федорова. Вып.3.- Донецк, 1993.- С.24-41.

#### АНОТАЦІЯ

Беззубко І.А. Принципи проектування робочих коліс автоматично регульованих шахтних осевих вентиляторів.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.06 - гірничі машини, Науково-дослідний інститут гірничої механіки ім.М.М.Федорова, Донецьк, 1995.

В дисертації розроблені принципи проектування, які базуються на сумісному аналізі аеродинамічного обтікання ідеальною рідиною, розвитку суміжного шару та силового навантаження лопаточної системи робочого колеса при шуканні її оптимальної конфігурації.

#### SUMMARY

I.A.Bezzubko. The designing principles of automatically adjusted mining axial flow fan impellers.

Thesis for the Candidate scientific degree of Technical science by speciality 05.05.06 - Mining Machines, The Scientific-Research Institute of Mining Mechanics named after M.M.Fedorov, Donetsk, 1995.

To find an optimum configuration of impeller vane cascades were elaborated designing principles at the thesis, which are based on joint analysis of potential flow through vane cascades, boundary layer development and forces act therein.

**Ключові слова:** осьовий вентилятор, робоче колесо, решітка, проектування, схема, дискретний вихор, циркуляція, аеродинамічний розрахунок, система рівнянь, суміжний шар, відрив, ламінарний, турбулентний, сила, момент сили, момент інерції, тензор, випробування, вимірювання.

Реззуб





Подп. к печати 13.02.95г. Формат 60x84/16. Бумага типографская №1.  
Усл. печ. л. - 1.5. Тираж 100 экз. Зак. № 43.

---

Ротапринт ил-та "Донецкий Стройпроект", 340114, г. Донецк,  
ул. Университетская, 80.

456581

AB 31.977

**AB 31.977**