

2. Тихомиров Д. А., Николаев В. И. Механическая обработка пластмасс. – Л. : Машиностроение, 1967. – 205 с.

3. Паньков Л. А., Костин Н. В. Обработка инструментами из шлифовальной шкурки. – Л. : Машиностроение, 1988. – 236 с.

S. N. Yakovlev, PhD in Engineering, Saint Petersburg State Polytechnic University

### Rough Finish and Final Polishing of Polyurethane Coating of Turned Part

*Chiselling conditions of polyurethane coating on lathe are provided. Methods of sanding, polishing by abrasive wheels, needlelike millers and abrasive belts are considered and recommendations for choosing the corresponding processing technique are given.*

**Key words:** chiselling conditions, modes of polishing, needlelike miller, abrasive cloth, surface defects.

УДК 621.69

**К. А. Михалев**, аспирант, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

**А. Н. Шельпяков**, кандидат технических наук, доцент, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ВИХРЕВЫХ УСТРОЙСТВАХ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

*Рассматривается возможность применения современных средств вычислительной гидродинамики к моделированию вихревых потоков. Проведен анализ и сравнение прикладных математических моделей.*

**Ключевые слова:** вихревое течение, моделирование, инженерный анализ, эжекторное устройство.

**В**ихревые устройства находят широкое применение в процессах опреснения и очистки воды; дегазации, осушки и обеспыливания; охлаждения, кондиционирования и теплоутилизации; смешения и гомогенизации. Известны работы по исследованию вихревых эжекторных устройств и вакуум-насосов, но до настоящего времени нет единой методики проектирования высокоэффективного вихревого эжекторного устройства [1].

Исследование вихревого потока представляет собой сложную задачу, так как он является трехмерным, высокоскоростным и турбулентным. Так, при исследовании вихревых камер больших размеров возникает необходимость создания больших расходов и давлений подаваемой на питание среды. При исследовании вихревых камер малых размеров аппаратные средства вносят существенные возмущения в поток, что нарушает достоверность проводимых исследований [2]. Кроме того, для проведения натурных исследований возникает необходимость изготовления экспериментальных образцов с различными геометрическими и аэродинамическими параметрами, что связано с большими временными и материальными затратами.

В настоящее время в качестве альтернативы экспериментальным и теоретическим исследованиям появилась возможность исследования с помощью вычислительных методов имитационного моделирования гидродинамических процессов с использова-

нием конечноэлементного анализа на основе системы уравнений Навье – Стокса [3]. Благодаря этому, прикладные пакеты вычислительной гидродинамики, такие как Ansys CFX, Fluent, FlowVision, Autodesk Simulation CFD, Siemens NX CAE и Gas Dynamics Tool нашли широкое применение в промышленности.

Процесс исследования при использовании программных комплексов можно разделить следующих основных этапов.

1. Разработка конструкции исследуемого объекта с помощью САД-систем и создание 3D-модели.
2. Разработка объемной модели проточной части исследуемого объекта.
3. Наложение на объемную модель сетки (разбивка на конечные элементы).
4. Назначение начальных условий расчетов: указание входов, выходов, характера сред и пр.
5. Проведение расчетов и получение картины течения.
6. Анализ результатов моделирования: физической картины течения, параметров потоков и др.

Исследование вихревого эжекторного устройства с помощью прикладных программ позволит выявить влияние геометрических параметров на характеристики устройства, определить параметры потока в вихревой камере.

Для проведения моделирования процесса работы вихревого эжекторного устройства использованы два программных комплекса – Ansys CFX и FlowVision.

В программные комплексы включены модели гидродинамики, теплопередачи, фазовых переходов, а также модели для расчета кавитации, сжимаемых жидкостей, теплообмена, теплопроводности, модуль для расчета влажного пара, а также несколько моделей турбулентности.

Точность расчетов и, как следствие, достоверность результатов складываются из отдельных составляющих – величины элементов сетки, в узлах которой будут определены значения параметров, и прикладной математической модели, включающей основные уравнения гидродинамики и дополнительные коэффициенты и слагаемые.

Для оценки влияния параметров сетки на результаты вычисления в программном комплексе FlowVision выполнен ряд расчетов. Меняя размер элементов и, соответственно, количество ячеек сетки, можем убедиться, что увеличение числа ячеек расчетной

сетки приводит к изменению результатов расчета, но после установления определенного числа ячеек значения результатов расчета изменяются в незначительной степени. Параметры модели при расчетах остаются постоянными (рис. 1).

Инструменты создания сетки имеют большое количество настроек, позволяют задавать локальное уменьшение элементов, так как неоправданное уменьшение размеров сетки по всему объему приводит к существенному увеличению длительности расчетов.

Вторым важным вопросом, определяющим точность расчетов, является определение модели турбулентности для вихревого течения.

На рис. 2 приведено сравнение результатов моделирования с использованием различных моделей турбулентности с результатами лабораторного эксперимента.

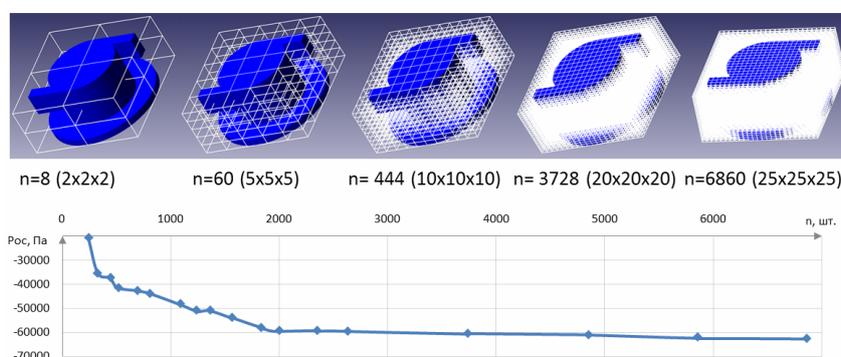


Рис. 1. Влияние количества ячеек расчетной сетки ( $n$ ) на результаты расчетов (величину полного давления на оси вихревой камеры  $P_{oc}$ )

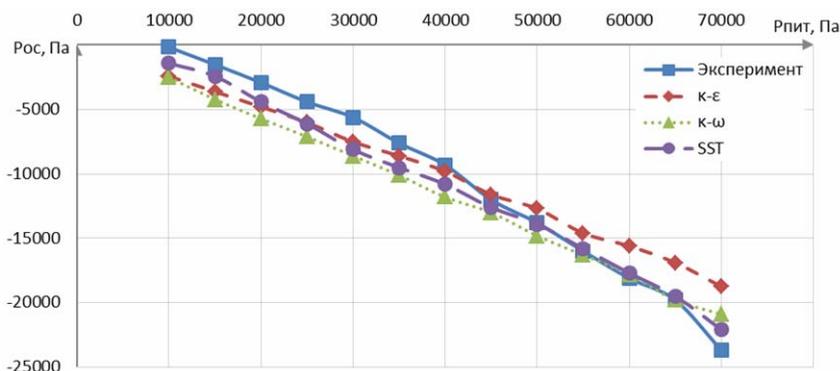


Рис. 2. Сравнение результатов натурального эксперимента и численного моделирования при использовании различных моделей турбулентности

Как видно из рисунка, использование современных средств моделирования позволяет с определенной точностью спрогнозировать результат исследований. При этом для моделирования вихревого эжекторного устройства наиболее близкими по значениям являются результаты, полученные при использовании SST – модели турбулентности. Так, для  $k-\epsilon$  модели средняя относительная погрешность составила 6,35 %, для  $k-\omega$  – 7,96 %, и для модели SST – 4,72 %.

Результаты моделирования отображаются с помощью инструментов визуализации скалярных

и векторных переменных на различных геометрических объектах, что позволяет проводить анализ течений и определять характеристики потока в определенных областях. Рассмотрим несколько основных методов визуализации переменных.

Характеристики. Метод характеристик представляет информацию о параметрах течения на выбранной линии, плоскости или по выбранному участку объема задачи, отображая фактические значения в расчетных ячейках или сохраняя их в отдельный внешний файл. Так, например, для тре-

буемого объекта могут быть выведены: среднее интегральное значение переменной по длине, площади или объему; максимальное и минимальное значения параметра; координаты точек максимума и минимума и некоторые другие.

**Векторы.** Метод векторов строит векторное поле по требуемой поверхности. Начало вектора – ячейка расчетной сетки, длина вектора – величина исследуемого параметра. Направление отрезка совпадает с направлением векторного поля в узле ячейки (рис. 3).

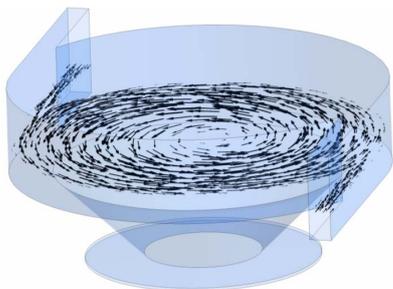
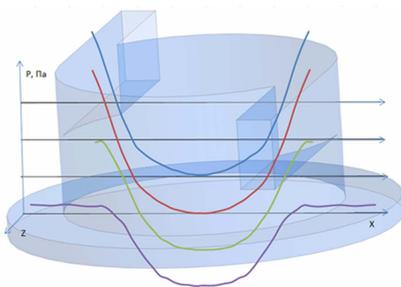
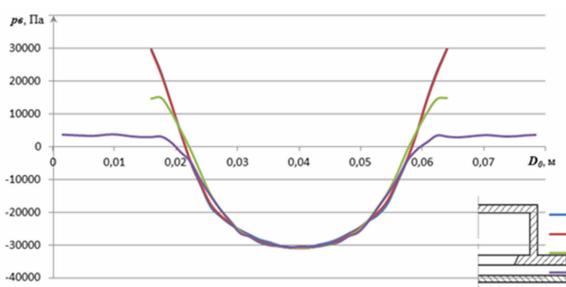


Рис. 3. Векторное поле скорости в сечении, перпендикулярном оси вихревой камеры



а



б

Рис. 4. Двумерный график распределения полного давления в поперечном сечении вихревой камеры: а – значения на линиях измерений; б – по данным из сохраненного файла

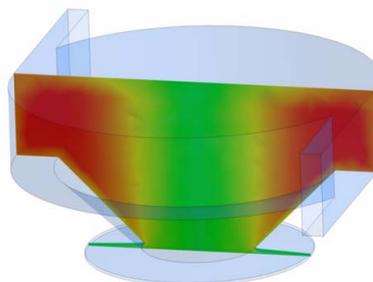
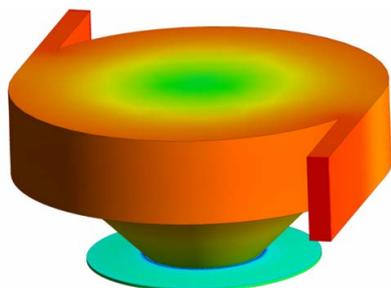


Рис. 5. Заливка по величине полного давления внутренней поверхности и продольного сечения вихревой камеры

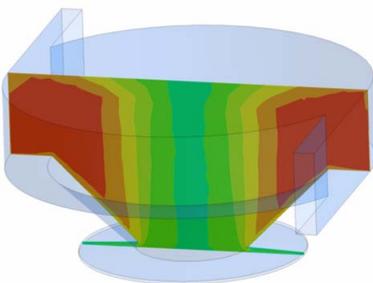
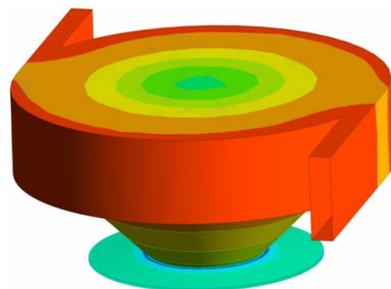


Рис. 6. Изолинии по величине полного давления поверхности и продольного сечения вихревой камеры

**Двумерный график.** Метод построения двумерного графика позволяет вывести на экран график скалярной переменной вдоль выбранного в пространстве отрезка. Данный метод удобен для сохранения значений в отдельном файле. Итоговый файл содержит геометрические координаты каждой точки отрезка и значения выбранного параметра (рис. 4).

**Заливка.** Метод заливки отображает распределение скалярной переменной на поверхности с помощью цветовых переходов. С помощью заливки наглядно представляется распределение переменной по требуемой поверхности, а также с помощью ручного задания границ заливки может быть выявлена область требуемых значений (рис. 5).

**Изолинии.** Изолинии имеют похожее с заливкой представление, но без плавных цветовых переходов, что позволяет выявить границы областей с определенным интервалом значений (рис. 6).

**Изоповерхность.** Аналогично с изоповерхностью постпроцессор позволяет в пространственном виде рассмотреть область с определенной величиной параметра. Так, на рис. 7 представлена граница области отрицательного давления.

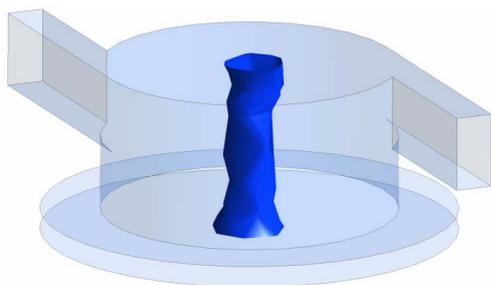


Рис. 7. Изоповерхность по величине полного давления в цилиндрической вихревой камере

Линии тока. Построение линий тока позволяет наблюдать общую картину движения жидкости и газа в расчетном объеме задачи (рис. 8).

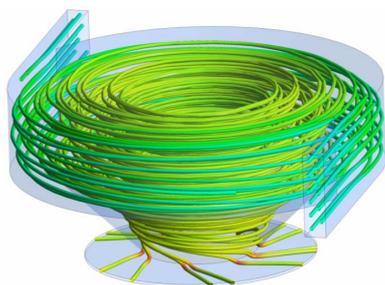


Рис. 8. Линии тока активного потока в вихревой камере. Наблюдается вход потока через каналы питания, закрутку в объеме камеры и выброс через выходной диффузор

С помощью собственного инструмента анализа в постпроцессоре возможно определение некоторых параметров течения в расчетной области:

- интегральных характеристик потока по сечению;
- максимальных, средних и минимальных значений параметра на отрезке, по сечению или по всему объему задачи;
- расходных характеристик исследуемого объекта, устройства;
- заданных пользователем вычислений, которые могут быть использованы при планировании эксперимента как выходной параметр.

В результате применения программ вычислительной гидродинамики появляется возможность получения физической картины сложных течений и их параметров, таких как скорости потока, давления, температуры и других в любой точке проточной части исследуемого объекта.

Возможности современных систем численного моделирования позволяют с достаточной степенью достоверности предсказывать характеристики вихревых устройств и параметры происходящих в них процессов. Благодаря встроенным инструментам анализа и расчетов программные комплексы позволяют проводить в автоматическом режиме многокритериальный факторный эксперимент, что в конечном итоге ведет к усовершенствованию конструкции исследуемого объекта.

#### Библиографические ссылки

1. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике. – Самара : Оптима, 1997. – 184 с.
2. Суслов А. Д., Мурашкин А. В., Чижиков Ю. В. Вихревые аппараты. – М. : Машиностроение, 1985. – 256 с.
3. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений : учеб. пособие. – СПб. : Балт. гос. техн. ун-т., 2001. – 108 с.

*K. A. Mikhalev*, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Votkinsk branch

*A. N. Shelpyakov*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Votkinsk branch

#### Simulation of Flow in Vortex Devices Using Computational Fluid Dynamics Software Systems

*The paper considers the possibility to apply modern means of computational fluid dynamics to model the vortex flows. The analysis and comparison of applied mathematical models is carried out.*

**Key words:** vortex flow, simulation, engineering analysis, ejector device.