

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Кафедра энергосбережения, гидравлики  
и теплотехники**

# **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные  
технологии и энергетический менеджмент»**

Минск 2013

УДК 004.9:620(075.8)

ББК 32.97я73

И74

Рассмотрены и рекомендованы редакционно-издательским советом университета

Р е ц е н з е н т

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации  
производственных процессов и электротехники Белорусского  
государственного технологического университета

*В. П. Кобринец*

По тематическому плану изданий учебно-методической литературы университета на 2013 год. Поз. 36.

Для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент».

© УО «Белорусский государственный  
технологический университет», 2013

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
<b>ПРОГРАММА FLOW VISION</b> .....	6
<b>I. Теоретическая часть.</b> .....	6
<b>1. Общая характеристика учебной версии пакета прикладных программ</b> .....	6
1.1. Физико-математические модели .....	6
1.2. Граничные и начальные условия .....	6
1.3. Особенности численных расчетов .....	7
2. Состав и назначение основных моделей пакета .....	8
2.1. Препроцессор .....	8
2.2. Солвер .....	10
2.3. Постпроцессор.....	10
3. Алгоритм моделирования.....	12
3.1. Геометрический препроцессор.....	12
3.2. Физико-математическая постановка задачи .....	13
3.3. Подготовка к численному моделированию .....	16
3.4. Моделирование с помощью солвера.....	18
3.5. Подготовка к визуализации результатов.....	19
3.6. Визуализация скалярных полей .....	22
3.7. Визуализация отдельных числовых значений .....	24
3.8. Визуализация векторного поля скорости .....	26
3.9. Представление результатов и подготовка отчета.....	28
<b>II. Практическая часть</b> .....	29
Лабораторная работа № 1. Течение вязкой жидкости в прямом плоском канале.....	29
Лабораторная работа № 2. Ламинарное движение вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе .....	32
Лабораторная работа № 3. Турбулентное движение вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе. ....	35
Лабораторная работа № 4. Турбулентное течение слабосжимаемой жидкости в смесителе.....	39
Лабораторная работа № 5. Обтекание воздушным потоком лопасти ветрового колеса .....	42
Лабораторная работа № 6. Работа водяного центробежного насоса.....	45
Лабораторная работа № 7. Обтекание воздушным потоком цилиндра роторной ветроустановки .....	49
Лабораторная работа № 8. Теплопроводность в многослойной стенке. ..	52

Лабораторная работа № 9. Естественная конвекция воздуха в прослойке между стеклами окна.....	56
Лабораторная работа № 10. Кожухотрубный теплообменник .....	59
Лабораторная работа № 11. Конденсатор .....	63
<b>ПРОГРАММА РАСЧЕТА СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ .....</b>	<b>66</b>
<b>I. Теоретическая часть .....</b>	<b>66</b>
1. Структура программы .....	66
2. Алгоритм оптимизации конструкции АВО.....	71
3. Подбор аппарата воздушного охлаждения.....	72
<b>II. Практическая часть .....</b>	<b>76</b>
Лабораторная работа № 1. Определение оптимального конструктивного исполнения АВО .....	76
Лабораторная работа № 2. Исследование различных типов исполнения оребрения.....	77
Лабораторная работа № 3. Определение оптимальной конструкции оребренной трубы. ....	78
Лабораторная работа № 4. Определение оптимальной частоты вращения вентилятора.....	79
Лабораторная работа № 5. Определение оптимального шага труб в трубном пучке .....	80
Список литературы .....	81

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Обязательным условием реализации образовательных программ подготовки специалистов высшей квалификации, ориентированных на будущую работу в сфере наукоемких технологий, является необходимость сочетания общетеоретических курсов с практическим освоением обучающимися явлений и процессов, с которыми приходится встречаться в различных научных и прикладных задачах. Наиболее адекватным инструментом решения такой задачи является полномасштабный лабораторный эксперимент. Однако при организации массового учебного процесса широкое использование экспериментальных методов и средств сопряжено с принципиальными ограничениями, связанными в первую очередь со сложностью и высокой стоимостью современных установок по воспроизведению массо- и теплообменных процессов во всем их разнообразии.

Возможной альтернативой является образовательная технология, основанная на проведении вычислительного эксперимента с использованием наукоемких пакетов прикладных программ. Сочетание широких возможностей адекватного количественного описания и визуального воспроизведения разнообразных гидродинамических и теплообменных процессов позволяет обучающимся в наглядном виде и условиях, приближенных к лабораторному эксперименту, познакомиться с изучаемым явлением (процессом) и провести сопоставление с соответствующими теоретическими положениями.

В качестве исходных программных продуктов используется учебная версия пакета прикладных программ Flow Vision [1]. Развитие прикладной математики и компьютерных технологий открывает новые возможности по моделированию реальных физических процессов, теоретическое описание которых в силу их сложности практически невозможно. Кроме того, использование прикладных программ при моделировании сложных явлений и процессов, в том числе с привлечением мультимедийных средств, позволяет в наглядном виде познакомиться со многими деталями явления (процесса), которые не могут быть воспроизведены другими способами. Однако при этом сохраняется определяющая роль теории и лабораторных экспериментов, так как в конечном счете только они могут служить мерилем правильности численного моделирования.

# ПРОГРАММА FLOW VISION

## I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1. Общая характеристика учебной версии пакета прикладных программ

**1.1. Физико-математические модели.** Базовыми в пакете прикладных программ Flow Vision являются уравнения Навье – Стокса (вместе с уравнением неразрывности). Для замыкания этих уравнений в зависимости от конкретной задачи могут использоваться дополнительные соотношения, описывающие изменение плотности, турбулентный перенос и т. п. Наборы таких соотношений в совокупности с уравнениями Навье – Стокса называются *моделями*. В Flow Vision наиболее полно представлены следующие модели:

- приближение Буссинеска (малые изменения плотности) для описания ламинарного течения вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса;
- $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентного течения вязкой жидкости с небольшими изменениями плотности при больших числах Рейнольдса;
- модель слабосжимаемой жидкости (в терминологии Flow Vision), которая позволяет рассчитывать стационарное дозвуковое течение газа при любых изменениях плотности;
- модель полностью сжимаемой жидкости (в терминологии Flow Vision): стационарное и нестационарное течение при любых числах Маха (до-, транс-, сверх- и гиперзвуковые течения).

Пакет прикладных программ Flow Vision допускает также использование модели теплопереноса в твердом теле, сопрягаемой с переносом тепла и вещества в жидкости (газе). Кроме того, в Flow Vision включены несколько специальных моделей (напрямую не связанных с уравнениями Навье – Стокса), из которых в учебную версию пакета входят только модели свободной поверхности, двухфазного течения и одна из моделей горения.

**1.2. Граничные и начальные условия.** В пакете прикладных программ Flow Vision допускается использование широкого набора

граничных условий, зависящих от конкретной модели, однако все они базируются на следующих наиболее часто встречающихся условиях для гидродинамических переменных (давления и скорости):

- прилипание или проскальзывание жидкости, задаваемое для вектора скорости на границах с твердыми телами;
- значение давления, обычно задаваемое на границах;
- значение скорости потока по нормали к границе или под углом к нормали;
- вытекание потока с нулевым градиентом давления;
- комбинации условий, перечисленных выше, например свободное вытекание жидкости с нулевыми градиентами давления и скорости или заданные на границе значения давления и скорости.

Следует заметить, что конкретные граничные условия, как и значения параметров уравнений (плотность, вязкость, теплопроводность и т. п.), могут задаваться переменными по времени.

Начальные условия необходимо задавать при рассмотрении моделей, соответствующих нестационарным движениям. В зависимости от вида моделирующих уравнений в начальный момент времени во всех точках расчетной области задаются значения искомых функций и (или) некоторых производных от них, причем эти значения могут быть различными в разных частях области.

**1.3. Особенности численных расчетов.** Для численного решения базовых уравнений в Flow Vision используется метод, основанный на консервативных схемах расчета нестационарных уравнений в частных производных, которые по сравнению с неконсервативными схемами дают решения, точно удовлетворяющие законам сохранения (в частности, уравнению неразрывности). По желанию пользователя для решения возникающей системы линейных алгебраических уравнений может использоваться как неявный (более надежный), так и явный (быстрее работающий, но расходящийся при больших шагах по времени) вариант итерационного процесса. Метод базируется на эйлеровом подходе к описанию движения жидкости, суть которого состоит в том, что различные скалярные и векторные величины рассматриваются как функции переменных Эйлера во времени и координат точки в неподвижной системе координат.

В Flow Vision численное интегрирование уравнений по пространственным координатам проводится с использованием прямоугольной адаптивной локально измельченной сетки (рис. 1). Такой подход

обеспечивает, с одной стороны, использование простой равномерной неадаптивной сетки при решении задач с относительно несложной геометрией. С другой стороны, появляется возможность при решении задач со сложной геометрией проводить адаптацию (подстройку) сетки к особенностям геометрии вблизи границ, а при решении задач с разрывными течениями – адаптацию по значениям искомых функций, их градиентов и др.

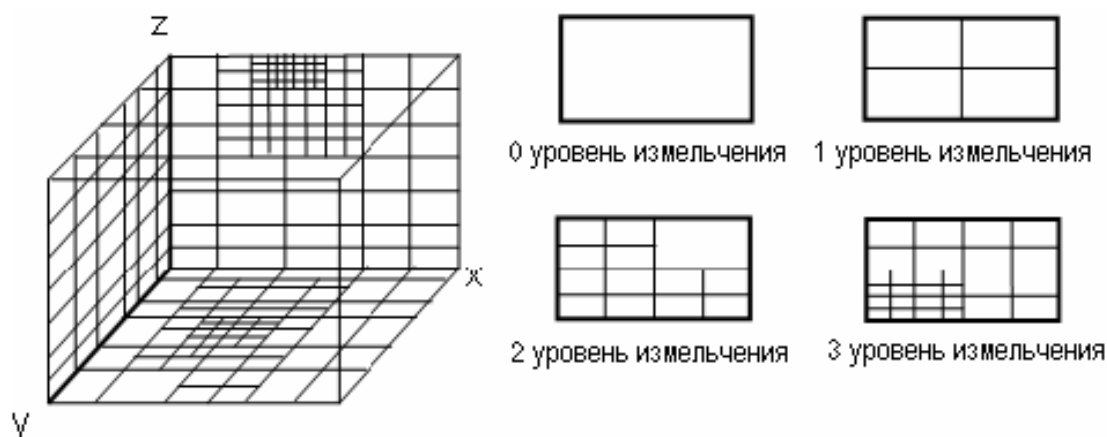


Рис. 1

Процедура локального измельчения в области адаптации предусматривает возможность последовательного деления, начиная с исходной, каждой предыдущей ячейки на 4 более мелкие ячейки (в трехмерном случае на 8) до обеспечения выполнения условия адаптации (например, достижения заданной точности вычисления градиента искомой функции).

Интерфейс Flow Vision включает возможности автоматического и ручного контроля формирования сетки, в том числе добавление или удаление ячеек сетки в определенных областях.

## 2. Состав и назначение основных моделей пакета

Как и большинство пакетов прикладных программ для численного моделирования, пакет Flow Vision формально делится на три модуля, называемые *препроцессором*, *солвером* и *постпроцессором*.

**2.1. Препроцессор.** Препроцессор (рис. 2) выполняет следующие основные функции:



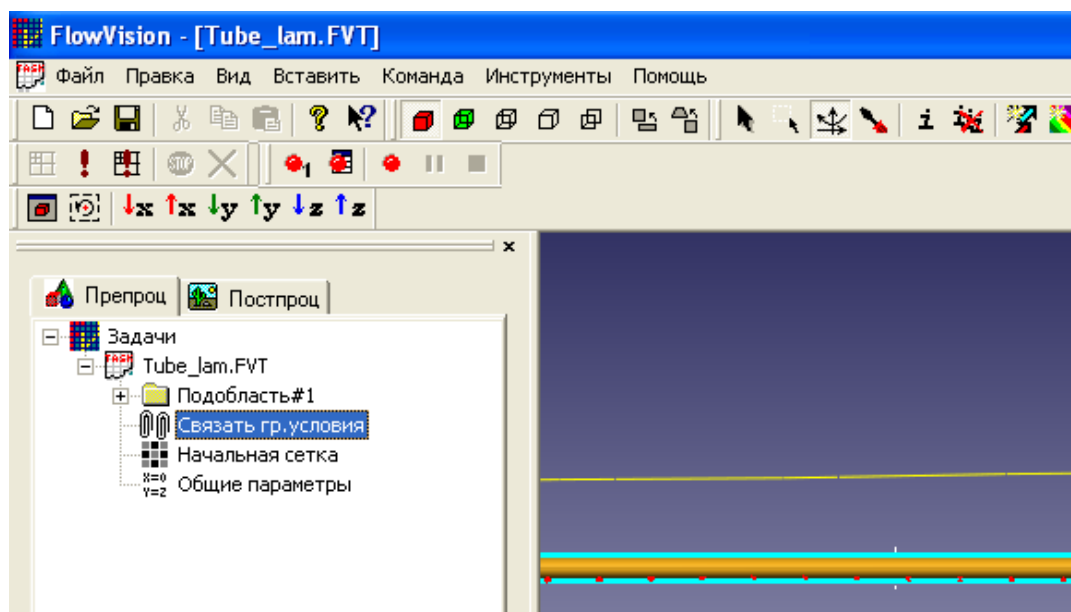


Рис. 2

- построение геометрической основы задачи – расчетной области, которая формируется с помощью внешних программ (так называемых геометрических препроцессоров) и затем импортируется в Flow Vision. Следует заметить, что Flow Vision работает только с трехмерной геометрией, поэтому двумерные модели необходимо рассматривать как частный случай трехмерных;

- физико-математическая постановка задачи: выбор модели для внутренних точек расчетной области (задание конкретного вида уравнений, значений коэффициентов), а также задание на границах расчетной области граничных условий, а для нестационарных задач – начальных условий;

- ввод параметров расчетной сетки и численного метода для численного решения задачи.

Дерево препроцессора содержит узлы с названиями типа **Подобласть#1**, соответствующие подобластям расчетной области (см. рис. 2). При этом если область пространственно неодносвязна, то число их больше 1. Также в дереве препроцессора имеются узлы **Начальная сетка** и **Общие параметры**, которые служат, прежде всего, для ввода параметров *численного* расчета. В каждой *подобласти* допускается задание своей модели: например, ламинарное течение несжимаемой и сжимаемой жидкостей, турбулентное, многофазное течения и т. д.

В свою очередь, узел **Подобласть** содержит дочерние узлы для задания граничных условий на расчетные переменные (узел **Гр. ус-**

ловия), начальных условий во всей расчетной области (узел **Начальные значения**) и собственно физических параметров, определяющих коэффициенты уравнений (узел **Вещество 0**), а также узлы для ввода и изменения параметров численного расчета (узел **Параметры метода**).

**2.2. Солвер.** Солвер обеспечивает численное решение поставленной задачи и как таковой невидим для пользователя (хотя многие его параметры задаются в препроцессоре). Работа с солвером в Flow Vision сводится к выбору пунктов меню **Команда (Начать вычисление, Сетка & Вычисление, Остановить вычисление)** или к нажатиям соответствующих кнопок панели инструментов (рис. 3).

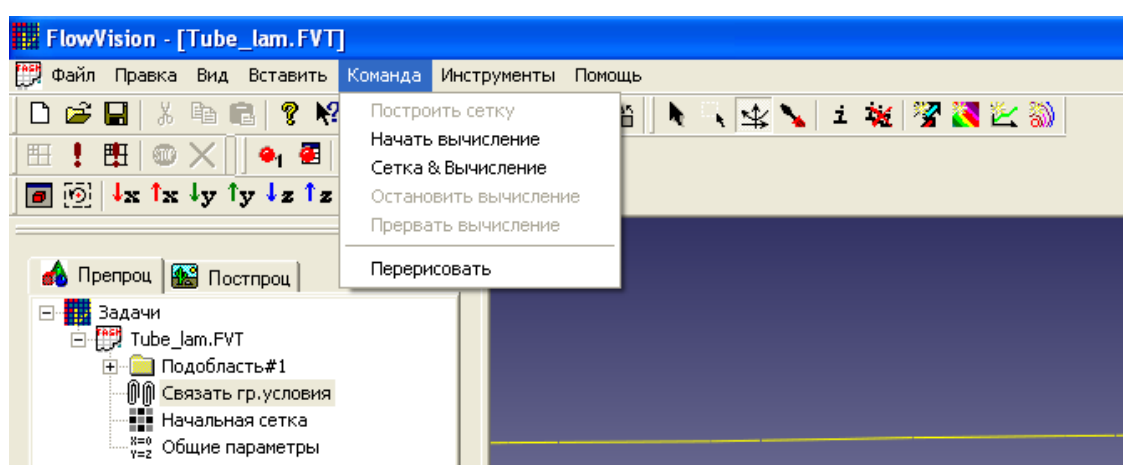


Рис. 3

Если не считать операций создания, открытия и сохранения файла, почти вся остальная работа с пакетом (т. е. с его препроцессором и постпроцессором) возможна без использования меню и панели инструментов. Для этого в левой части окна Flow Vision расположены две вкладки **Препроц.** и **Постпроц.**, в каждой из которых находится дерево для показа всех элементов модели и выполнения действий с ними.

**2.3. Постпроцессор.** Постпроцессор служит для вывода и представления полученных в результате расчетов данных. В Flow Vision используется большой набор методов визуализации, которые классифицируются по типу представляемых математических величин: скалярная величина, скалярное поле, векторное поле (скорости), а также по используемой геометрии (трехмерной или двумерной). Важно, что данные могут выводиться на любом этапе расчета, и это позволяет отслеживать динамику моделируемого процесса.

Дерево постпроцессора содержит следующие узлы (рис. 4):

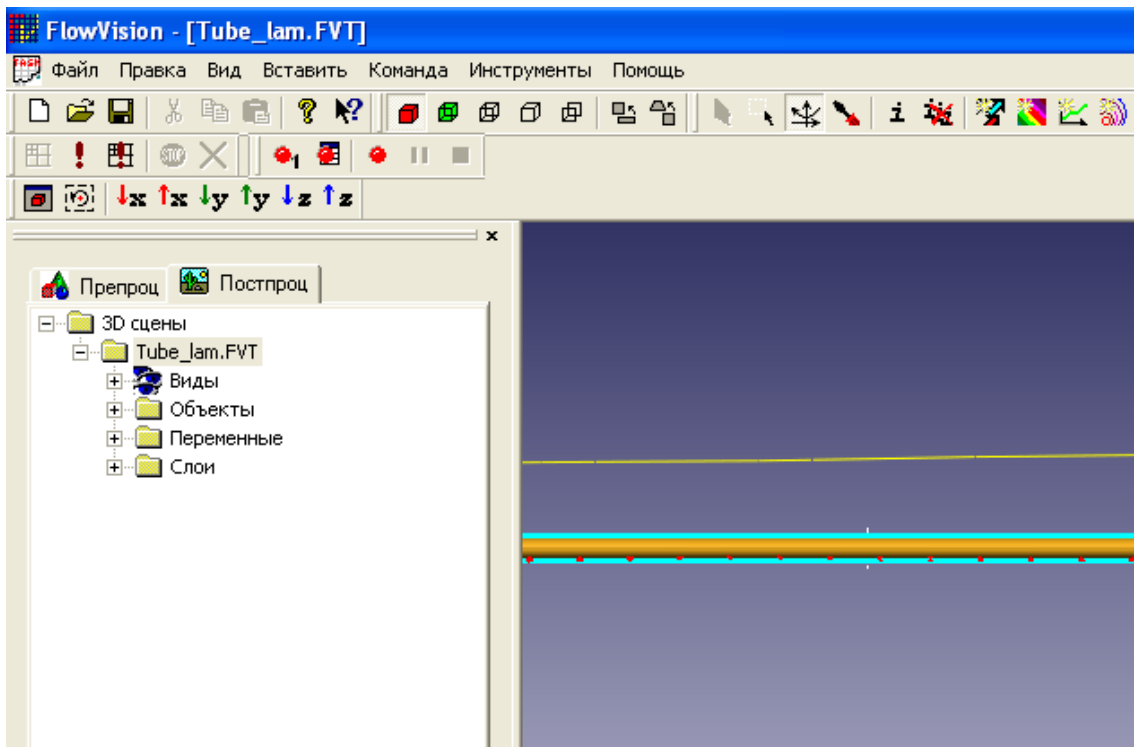


Рис. 4

- **виды** – для изменения точки зрения на трехмерное тело (проекции тела на плоскость экрана): с помощью дочерних узлов узла **Виды** можно совместить плоскость экрана с одной из плоскостей  $(x, y)$ , или  $(x, z)$ , или  $(y, z)$ ;




- **переменные** – содержит узлы, соответствующие переменным модели (их перечень зависит от модели);

- **слои** – для управления всеми графическими элементами (так называемыми слоями визуализации, которые отображаются в правой части окна);

- **объекты** – для редактирования объектов (линий, плоскостей, параллелепипедов), служащих геометрической основой слоев.

Для выполнения действий с узлами деревьев препроцессора или постпроцессора, как правило, необходимо вызывать контекстное меню, нажимая на соответствующий узел правой кнопкой мыши. Наиболее часто используется пункт **Свойства**, открывающий типовое окно с параметрами выделенного в дереве объекта.









Для того чтобы исключить необходимость каждый раз закрывать и открывать окно свойств, рекомендуется прикрепить это окно к экра-

ну (нажав в нем кнопку ) . После ввода любой информации для ее сохранения следует нажимать кнопку  в окнах свойств и кнопку **ОК** в других диалоговых окнах. Окно свойств, возникающее для создания какого-либо узла дерева, после сохранения введенных данных следует закрывать (нажатием на кнопку  в углу окна).



### 3. Алгоритм моделирования


В данной главе описывается последовательность действий, необходимая для решения задач в пакете Flow Vision. Следует заметить, что первое из этих действий выполняется с помощью внешней программы – геометрического препроцессора.


В качестве такого препроцессора используется пакет Solid Works, относящийся к семейству САДов (Computer-Aided Design – автоматизированное проектирование), которые получили широкое распространение в современной научной и инженерной практике.

**3.1. Геометрический препроцессор.** После запуска программы Solid Works следует нажать на кнопку **Создать**  и выбрать **Деталь**. В левой части окна новой детали нужно выделить **Плоскость 1**, после чего нажать на третью сверху кнопку **Эскиз**  на правой панели инструментов. Для удобства соблюдения нужных размеров целесообразно нанести масштабную сетку (0,1 м) между основными линиями посредством нажатия на вторую сверху кнопку  той же панели с последующей установкой флажка **Отображать масштабную сетку**. В качестве элементов расчетной области чаще всего используются прямоугольник, линия, окружность или ее часть; они создаются, соответственно, с помощью кнопок **Прямоугольник** , **Линия** , **Окружность** , **Дуга через 3 точки** , находящихся на правой панели инструментов. Чтобы нарисовать сложные фигуры типа эллипса (которого нет на панели инструментов), следует выбрать пункт из меню **Инструменты/Объекты эскиза**. Масштаб (размер изображения на экране) меняется либо с помощью колеса мыши, либо после нажатия кнопки **Увеличить/уменьшить вид**  в верхней части экрана – перемещением указателя мыши вверх или вниз при нажатой левой кнопке. С помощью пункта меню **Вставка/Основание/Вытянуть... – ОК** начерченный замкнутый контур (прямоугольник) превращается в трехмерное тело (еще раз отметим, что пакет Flow




Vision работает только с трехмерной геометрией). Размер по третьей координате (0,01 м) здесь менять не нужно (в плоских задачах он несуществен).

Для разметки границ следует несколько раз повторить следующую операцию: выделить какую-либо границу тела, щелкнув по ней (при этом она приобретает зеленоватый оттенок), затем нажать на кнопку **Редактировать цвет**  в середине верхней панели инструментов и выбрать один из цветов. Между этими операциями часто требуется вращать тело в пространстве, для чего используется кнопка **Вращать вид**  в правой части верхней панели. Физически различные границы расчетной области должны быть помечены различными цветами; но все границы помечать цветом необязательно.

Экспортировать созданное трехмерное тело и сохранить в формате VRML через пункт меню **Файл/Сохранить как...** (тип файла \*.WRL). Запустить программу Flow Vision и импортировать созданную геометрию, для чего нажать на кнопку **Создать** , затем указать путь к созданному в Solid Works файлу \*.WRL. После этого в правой части окна Flow Vision должно появиться изображение того же самого трехмерного тела, что и в Solid Works (только разделенное посередине плоскостью).

**3.2. Физико-математическая постановка задачи.** Для выбора математической модели (набора уравнений) необходимо раскрыть дерево, щелкнув левой кнопкой мыши по узлу , затем выделить правой кнопкой узел дерева **Подобласть#1**. В появившемся контекстном меню выбрать пункт **Изменить модель...**, далее в открывшемся окне выбрать один из пунктов раскрывающегося списка **Модель**.

В колонке **Уравнение** показаны имена уравнений (или систем уравнений), которые составляют эту модель (рис. 5). В колонке **Расчитывать** отмечаются уравнения, по которым будет проводиться данный вариант расчета (если галочки нет, то уравнение и переменная исключаются из расчетов).

Для ввода физических параметров через контекстное меню узла дерева **Вещество 0** открыть окно свойства вещества (рис. 5); выбрать нужные параметры (при необходимости можно пользоваться стрелками ). Затем в верхней строчке таблицы (*Значение*) числовых значений параметров нажать кнопку , а затем либо закрыть окно свойств, либо прикрепить () его к экрану.

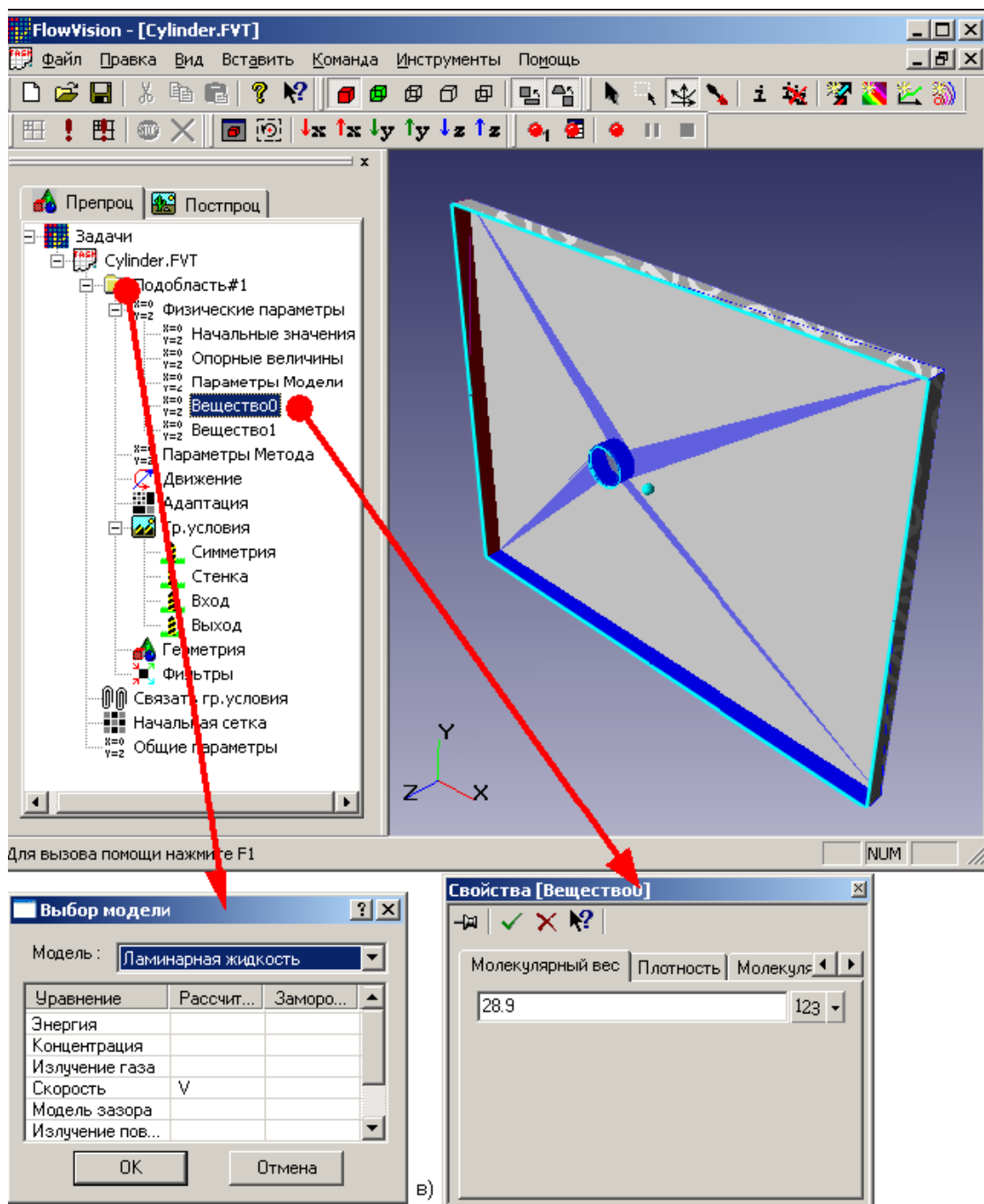


Рис. 5

Для ввода граничных условий в ветви дерева **Гр. условия** выделить соответствующую границу в дереве (при этом в правой (основной) части окна помеченная граница окрашивается в цвет, заданный ранее). Далее открыть окно редактирования граничного условия либо через пункт контекстного меню **Редактировать**, либо через кнопку **Ed** в окне свойств (рис. 6).

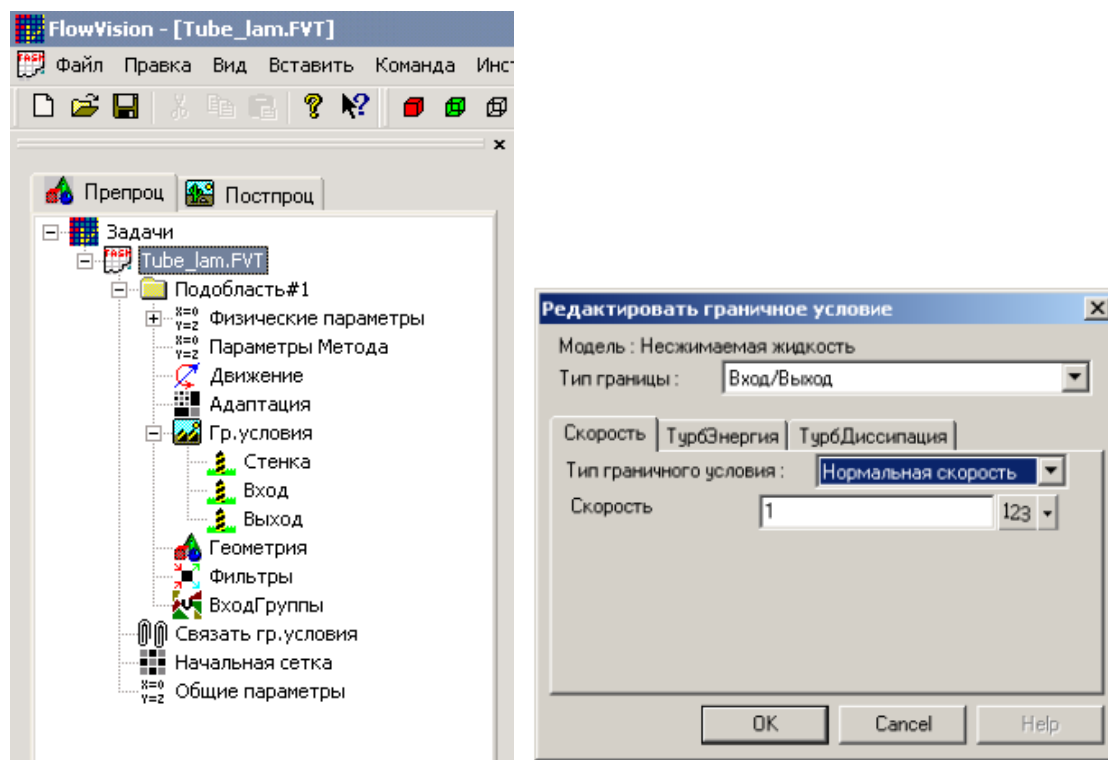


Рис. 6

Возможны следующие характерные комбинации типов граничных условий:

- **тип границы** – Стенка, **тип граничного условия** – Стенка с проскальзыванием (обращение в нуль нормальной компоненты скорости) или Стенка (обращение в нуль всех компонент скорости);
- **тип границы** – Вход/выход, **тип граничного условия** – Нормальный вход/выход или Давление на входе;
- **тип границы** – Свободный выход, **тип граничного условия** – Нулевое давление/выход.

Для облегчения дальнейшей работы границы желательно переименовать (назвав Стенка, Вход, Выход и т. п.) либо через пункт контекстного меню Переименовать, либо через окно свойств граничного условия. Далее открыть окно редактирования граничного условия либо через пункт контекстного меню **Редактировать**, либо через кнопку **Ed** в окне свойств.

Для ввода начальных условий с помощью фильтра в препроцессоре правой кнопкой мыши щелкнуть по значку **Фильтры**, затем – **Создать**. В раскрывающемся списке **Объект** выбрать **Все пространство**, в списке **Тип** – **Установка переменной**. Во вкладке

Установить значение выбрать тип фильтра **Одноразовый**, выбрать название переменной (например,  $x$ -скорость) и ввести ее значение.

**3.3. Подготовка к численному моделированию.** Для построения расчетной сетки в окне свойств объекта **Начальная сетка**, находящемся во вкладке **X-направление** дерева препроцессора, следует задать число ячеек вдоль направления движения потока (рекомендуется согласовать с преподавателем), после чего нажать на кнопку **Равном.** (равномерная сетка). То же самое следует проделать с сеткой в поперечном направлении, перейдя во вкладку **Y-направление** и **Z-направление** в том же окне (рис. 7).

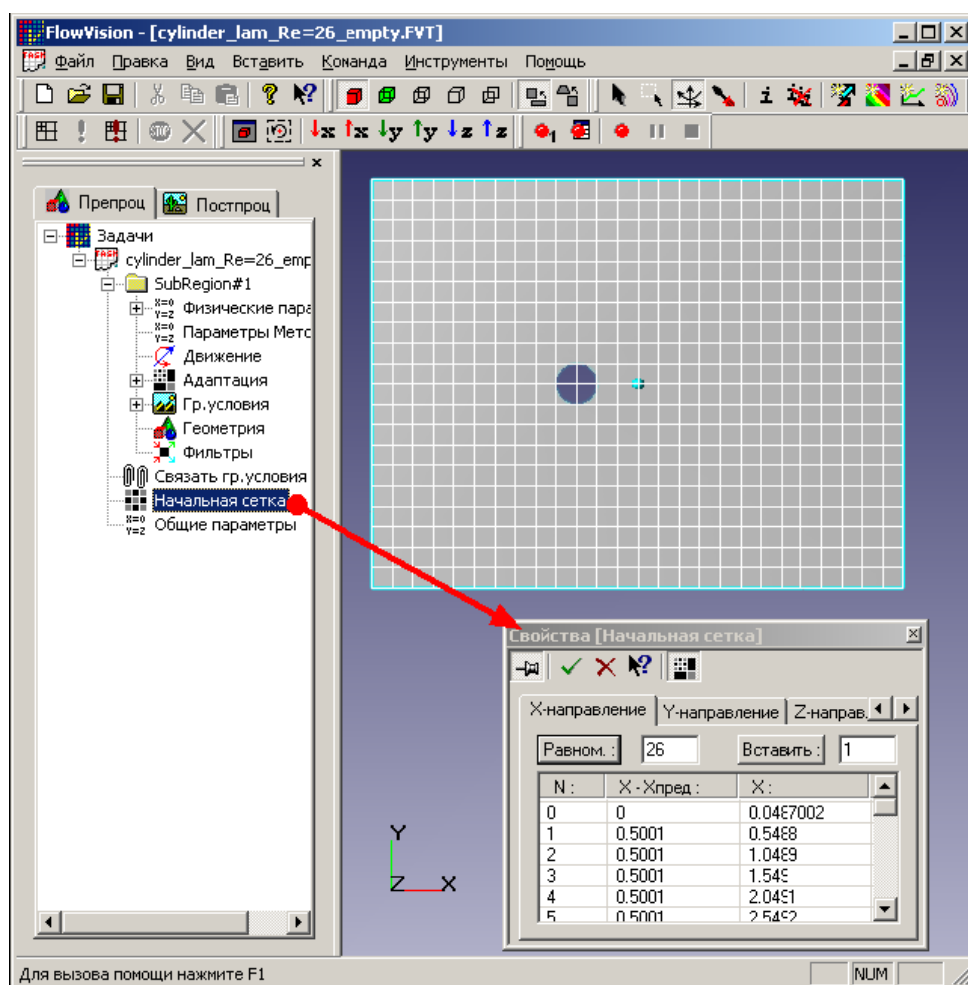



Рис. 7

В случаях, когда требуется сгустить сетку, в некоторых частях расчетной области следует произвести визуализацию расчетной сетки, для чего необходимо нажать соответствующую кнопку в окне свойств сетки . Для добавления дополнительных линий сетки следует вы-



делить в окне свойств соседнюю с добавляемой линией (вертикальную во вкладке **X-направление** или горизонтальную во вкладке **Y-направление**). При этом добавленная линия выделяется красным цветом. Затем следует нажать кнопку **Вставить**.

Для повышения точности расчета можно провести измельчение сетки вблизи поверхности. Для этого в окне свойств граничного условия задается уровень адаптации. В диалоговом окне **Свойства** граничного условия задается уровень, до которого все ячейки, включающие в себя поверхность с данным граничным условием, будут измельчены (рис. 8).

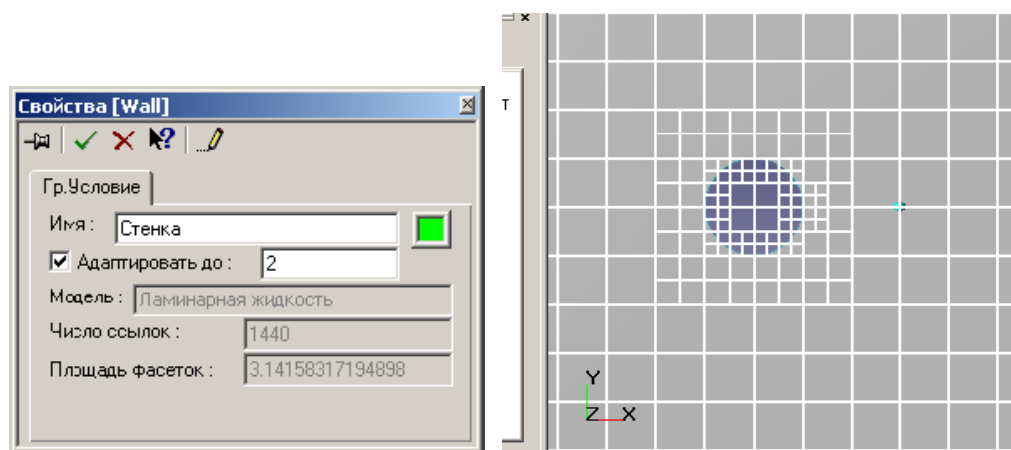


Рис. 8

Ввод параметров численного расчета осуществляется с помощью вкладки **Шаги** в окне свойств узла дерева препроцессора **Общие параметры** (рис. 9). При этом, как правило, параметры адаптации сетки: узел дерева **Адаптация**, параметры численного метода – узел **Параметры метода** – изменять не требуется.

Основные параметры расчета – **Макс. шаг** и **CFL** (неявный CFL, расположенный слева от **Макс. шаг**) – определяют выбор программой расчетного шага по времени. CFL – это так называемое число Куранта; его физический смысл можно трактовать как максимальное число ячеек сетки, которое малый объем жидкости может преодолеть за один шаг по времени. По умолчанию  $CFL = 1$ , и в этом случае объем смещается по времени не более чем на одну ячейку. Однако для повышения скорости расчета можно задавать другие значения CFL (по согласованию с преподавателем).

Параметр **Макс. шаг** обладает большим приоритетом, чем CFL, поэтому управлять шагом по времени рекомендуется именно через

этот параметр. При выборе шага по времени стоит предварительно оценивать характерное время течения через одну ячейку

$$\tau \sim L / (N \cdot u),$$

где  $L$  – размер области в направлении течения;  $N$  – число расчетных ячеек в этом направлении;  $u$  – характерная скорость течения.

При выбранном расчетном шаге по времени, значительно большем  $\tau$  (более чем на 2 порядка), точность решения окажется низкой или численное решение задачи не будет соответствовать физическому смыслу: значения искомых величин в разных расчетных точках будут различаться на много порядков (это называется *расходящимся решением*). С другой стороны, при шаге по времени, существенно меньшем  $\tau$ , численное решение будет хорошо сходиться к точному (например, аналитическому) решению, однако для его получения потребуется слишком много расчетного времени (что является неоправданным в условиях ограниченности времени занятий).

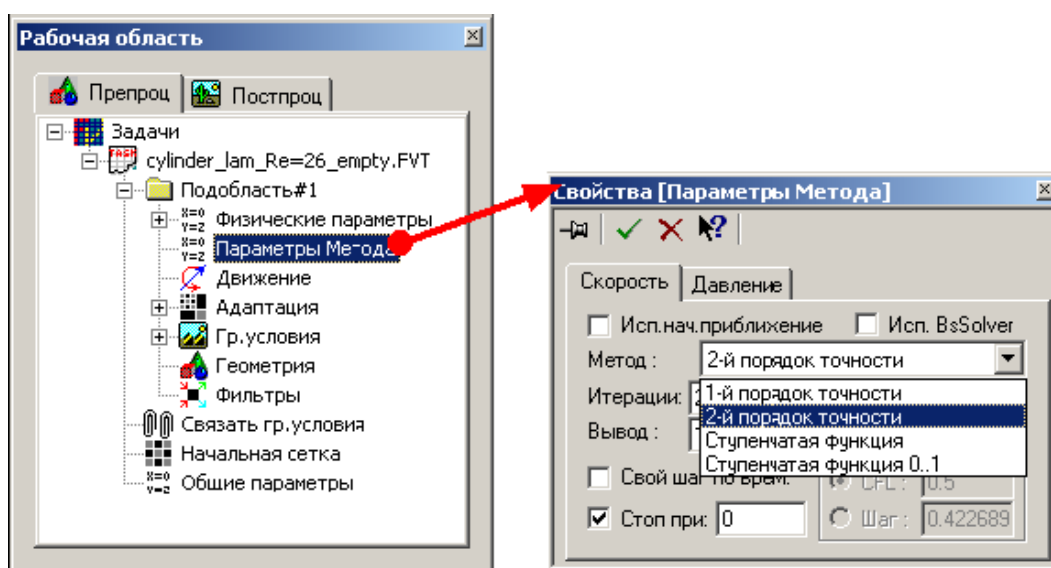





Рис. 9

**3.4. Моделирование с помощью солвера.** Расчет задачи выполняется нажатием кнопки  (в первый раз) или кнопки  (рис. 10). В процессе расчетов следует обращать внимание на нижнюю часть окна Flow Vision, где отображаются текущее время, шаг по времени и максимальные погрешности в вычислении давлений и скоростей (в столбце **Погрешность**). В корректном расчете эти погрешности не должны превышать 0,01 (1%). Следует отметить, эта погрешность

относится к одному шагу по времени и имеет лишь косвенное отношение к точности получаемого конечного решения. Расчет прекращается нажатием кнопки .

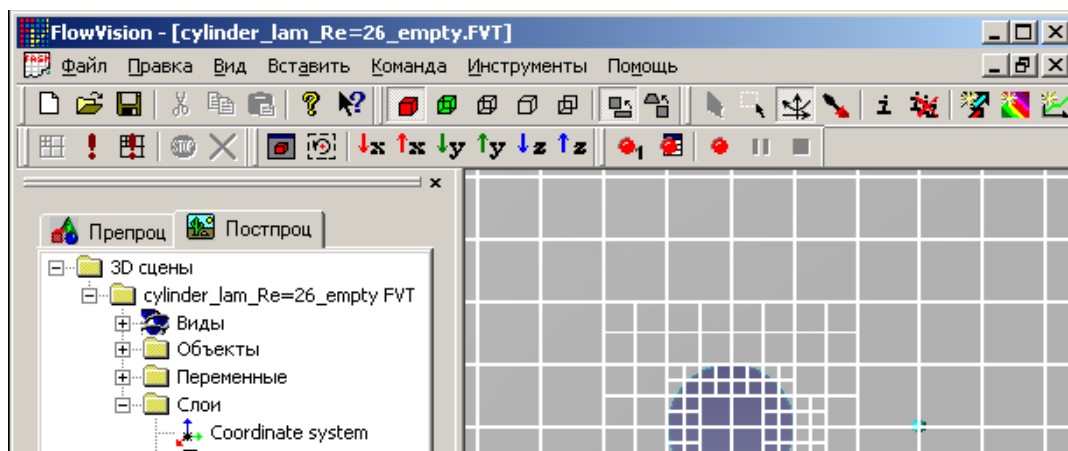


Рис. 10

Окончательный расчет проводится после настройки параметров постпроцессора. При этом расчет стационарных задач следует завершать, когда течение можно считать установившимся (визуальная картина полученного течения остается постоянной, а значения параметров меняются со временем достаточно мало). Более точные способы оценки момента остановки расчета базируются на анализе динамики интегральных характеристик, которую можно считать экспоненциальной:  $y = A + B \exp(-at)$ .

Возвращение расчета в начальное состояние, как правило, необходимо проводить после исправления существенных ошибок в данных, введенных в препроцессор: такие ошибки могут проявляться в виде сообщений об ошибках, например, в виде очень больших (« $1e + 10$ ») погрешностей или в принципиально неверном характере наблюдаемого течения. Для возвращения к началу в окне свойств узла дерева препроцессора **Общие параметры** во вкладке **Старт** необходимо снять флажок *Продолжать вычисление*, а во вкладке **Время** ввести значение 0 в поле *Сейчас*. При проведении расчетов следует учитывать также, что рассчитываемые переменные сохраняются в файле **Flow Vision**: в процессе расчетов сохраняются каждые  $N$  шагов по времени, где  $N$  по умолчанию равно 50 и может быть изменено в поле **Частота автосохранения/По итерациям** той же вкладки **Время**.

**3.5. Подготовка к визуализации результатов.** Работа в постпроцессоре начинается с перехода во вкладку **Постпроц.** левой

части окна. В окне нужно раскрыть дерево (+) до узла **Объекты** включительно (рис. 11).

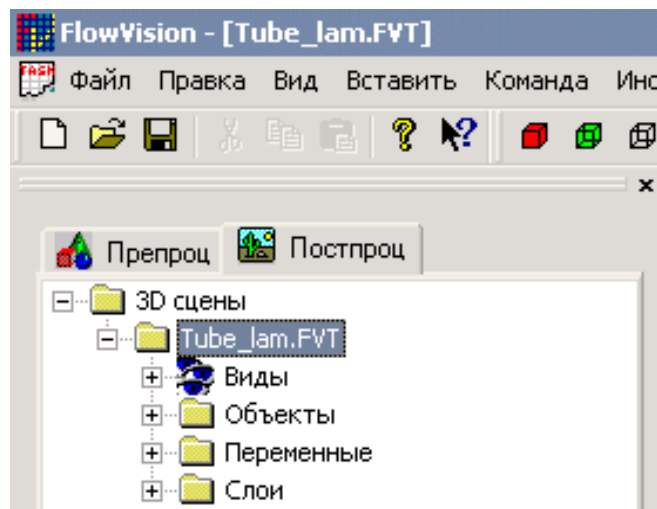


Рис. 11

В начале работы с постпроцессором желательно, чтобы перед этим все переменные получили свои характерные значения, не противоречащие физическому смыслу задачи; для этого следует провести предварительный тестовый расчет (3–10 шагов по времени).

Если этого не сделать, многие максимальные и минимальные значения параметров в постпроцессоре (например, на осях графиков) придется вводить вручную.

Чтобы визуализировать переменную, необходимо задать соответствующий слой.

Слой задается из трех составляющих:

- геометрический объект (шаблон линии, шаблон плоскости, шаблон прямоугольного параллелепипеда, шаблон конуса);
- имя переменной (скорость, давление и др.);
- метод ее отображения (двумерный график, график вдоль кривой, график по окружности, характеристики, векторы, изолинии, заливка, изоповерхность).

Для создания объекта плоскости в дереве постпроцессора из контекстного меню узла **Объекты** (или любого объекта, например, **Шаблон плоскости**) выбирается пункт **Создать объект**; в появившемся окне в качестве типа объекта задается **Шаблон плоскости** (рис. 12). Если создается основная плоскость (совпадающая с плоскостью течения), то нормальный вектор к ней нужно задать как  $(1, 0, 0)$ , а также выставить флажок *Отсекающая плоскость* (рис. 13).

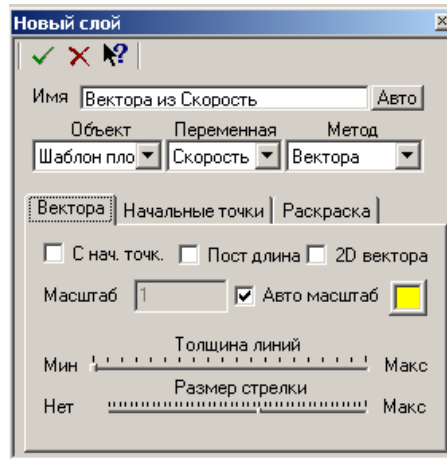


Рис. 12

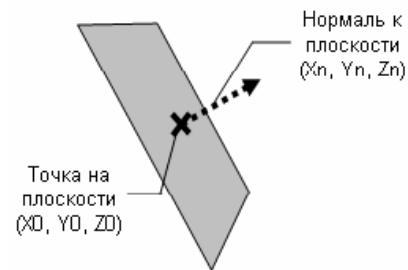
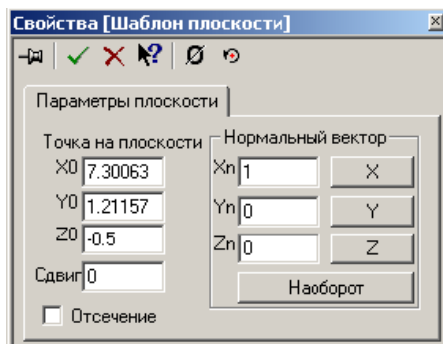


Рис. 13

Для создания объекта линии из контекстного меню узла **Объекты** выбирается пункт **Создать объект**; далее в появившемся окне в качестве типа объекта необходимо выбрать **Шаблон линии**. Для горизонтальных линий вектор (нормальный), задающий направление линии, имеет компоненты (1, 0, 0), а для вертикальных – (0, 1, 0); кроме того, положение линии определяется координатами точки **Источник прямой** (рис. 14).

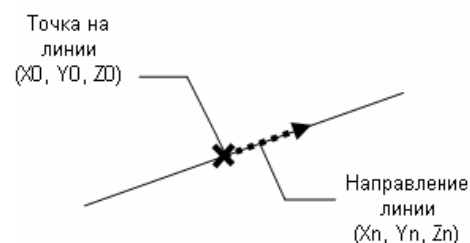
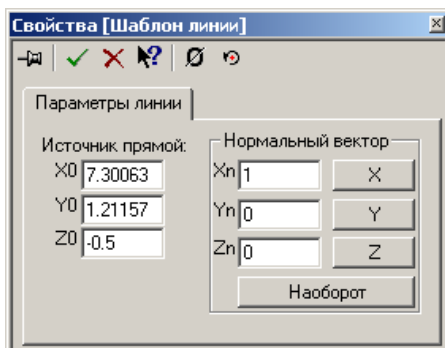


Рис. 14

**3.6. Визуализация скалярных полей.** Для изображения распределения переменной в плоскости методом цветовой (тоновой) заливки (рис. 15) из контекстного меню основной плоскости задачи необходимо выбрать пункт **Создать слой**.

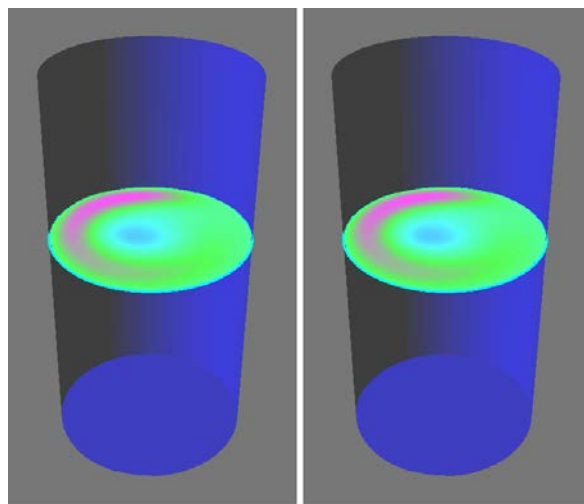


Рис. 15

В раскрывающемся списке **Переменная** – задать переменную для показа цветами (например, Давление или Модуль Скорости), в списке **Метод** – Заливка. Если необходимо изменить соответствие между цветами и значениями переменной, то во вкладке **Покрывтие** после изменения значений **Макс** и **Мин** следует нажать кнопку **Переопределить цвета**.

Для создания двумерного графика (рис. 16) из контекстного меню соответствующего объекта-линии (вдоль этой линии будет располагаться ось  $x$  графика) выбрать пункт **Создать слой**; в раскрывающемся списке **Переменная** – задать переменную для показа вдоль оси  $y$  (например, Давление или Модуль Скорости), в списке **Метод** – Двумерный график, после чего убрать флажок *Авто* напротив слова **Ориентация** (рис. 17).

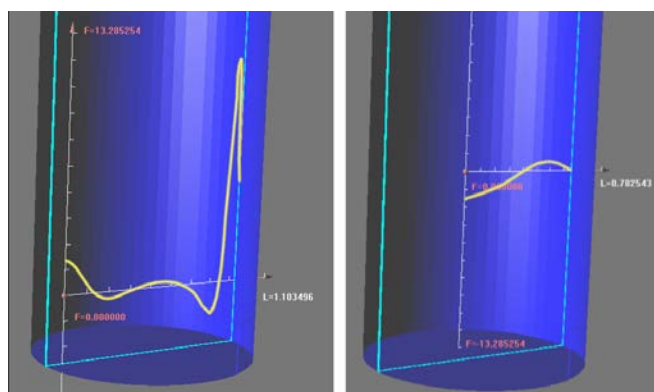


Рис. 16

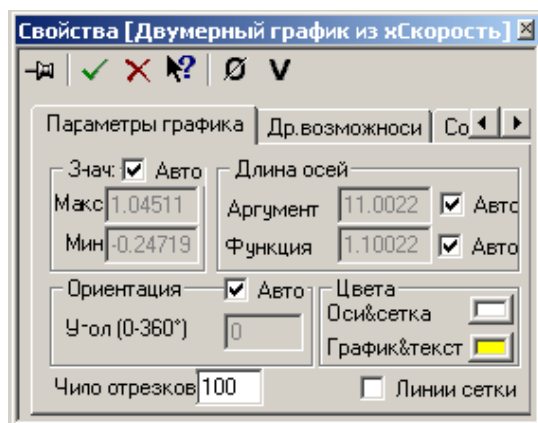


Рис. 17

Если после применения изменений () график не виден (или его ось  $y$  направлена не в ту сторону), то следует изменить угол ориентации графика с нуля на 90, 180 или 270 градусов. Если же ось  $x$  направлена в противоположную сторону, то нужно поменять на противоположное направление нормального вектора того объекта-линии, на котором построен график. Для того чтобы ось  $x$  графика занимала полностью отрезок пересечения этой линии с расчетной областью, нужно перенести начальную точку (источник прямой) линии (начало координат графика совпадает с ней).

При создании графика вдоль кривой (рис. 18), редактируя свойства плоскости, совпадающей с плоскостью течения, следует перенести ее начальную точку в начало кривой, вдоль которой будет строиться график, например, в начало образующей цилиндра. После этого из контекстного меню построенной плоскости выбирается **Создать слой**, в раскрывающемся списке **Переменная** указывается Скалярная переменная (например,  $x$ -скорость), в списке **Метод** – График вдоль кривой. Далее следует применить изменения () , и если график оказался не в том месте, где ожидалось, то выбрать другой пункт из списка, расположенного во вкладке **Кривая**. Остальные свойства графика вдоль кривой изменяются так же, как и для обычного графика.

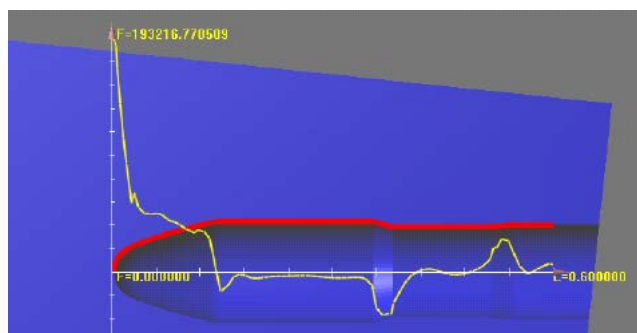


Рис. 18

Чтобы сравнить графики результатов расчета с теорией, рекомендуется построить на той же линии (прямой или кривой) график теоретической зависимости переменной от координаты. Для этого нужно из контекстного меню узла **Переменные** выбрать пункт **Создать скаляр**, в появившемся окне (рис. 19) ввести имя переменной и ее зависимость от  $x$  и/или  $y$  (используя скобки, арифметические операции и функции: их список называется **Операции**, расположен в нижней части окна).

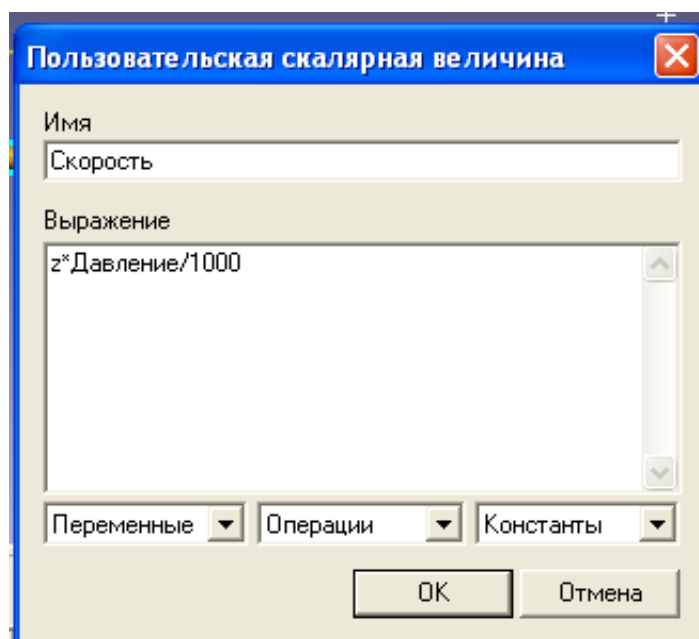



Рис. 19

После введения такой переменной ее график строится точно так же, как и график расчетной переменной.

**3.7. Визуализация отдельных числовых значений.** Для вычисления интегральных характеристик (осредненных по сечению значений переменных) из контекстного меню соответствующего объекта-плоскости (как правило, перпендикулярной течению) выбрать пункт **Создать слой**; в раскрывающемся списке **Переменная** задать переменную для показа, в списке **Метод** – **Характеристики**. Для просмотра значений характеристик необходимо открыть и прикрепить () информационное окно с таблицей, выделив слой в дереве и нажав на кнопку панели инструментов  $i$  (или выбрав пункт меню **Вид/Открыть инфо-окно**). По умолчанию характеристики являются интегральными, т. е. они получаются усреднением переменных по сечению плоскости, указанной при создании данного слоя (рис. 20, *a*).



В строке  $\langle f \rangle$  по площади приведена осредненная по площади величина скалярной переменной  $f$  (рис. 20, б).

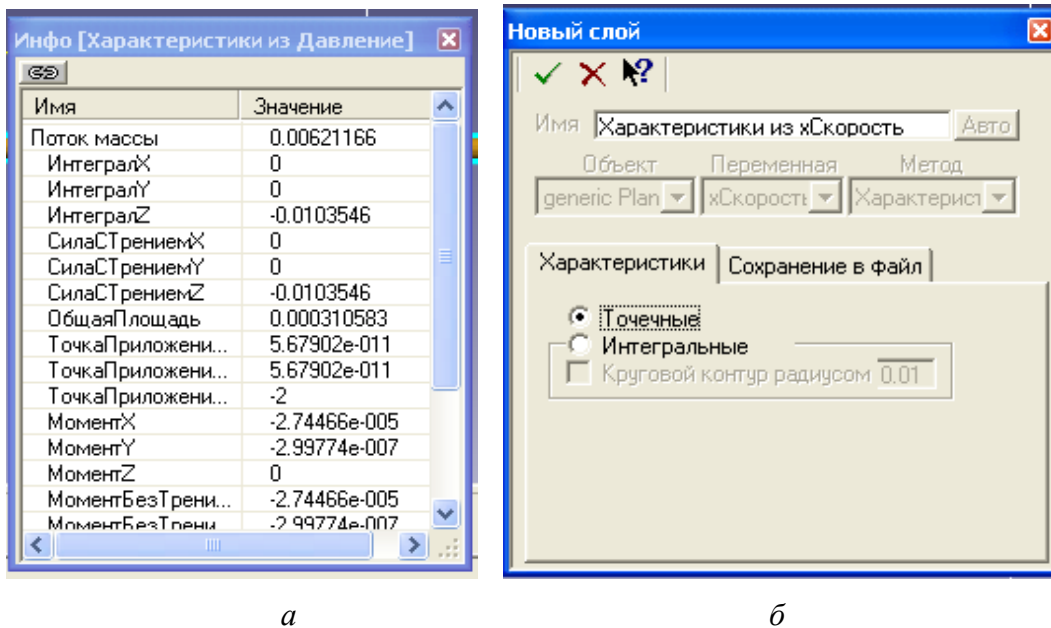


Рис. 20

Чтобы записать таблицу характеристик в файл, во вкладке **Сохранение в файл** следует отметить флажок *Записывать данные в файл* и задать имя файла (рис. 21). В процессе расчетов в файл будут записываться изменения характеристик во времени.

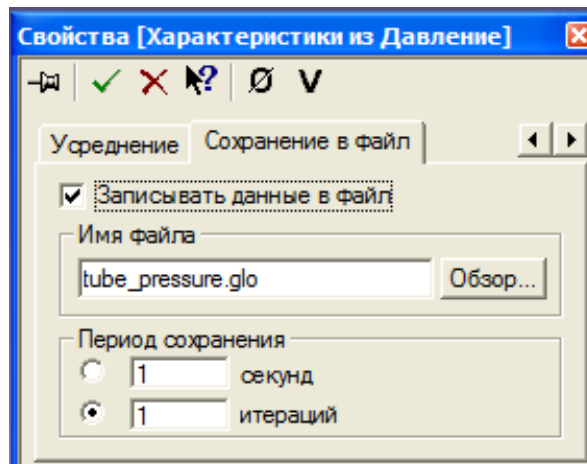


Рис. 21

Группа элементов управления **Период сохранения** контролирует период вывода информации в файл. Если выделен пункт  $N$  секунд, то

представление слоя будет выводиться в файл каждые  $N$  секунд расчетного времени. Если выделен пункт  $M$  итераций (см. рис. 21), то представление слоя будет выводиться в файл каждые  $M$  итераций. Каждая новая запись добавляется в конец существующего файла, не уничтожая предыдущие записи.

Чтобы показать только значение переменной в одной точке, во вкладке **Характеристики** окна свойств созданного слоя в расположенном справа переключателе нужно выбрать вариант **Точечные**.

Для создания **Характеристики** на **Супергруппе** на сформированных граничных условиях необходимо выбрать пункт контекстного меню **Создать супергруппу**, что приведет к появлению в дереве препроцессора объекта (супергруппы), например, под названием **Цилиндр группы**, если граничное условие называлось **Цилиндр**. Далее из контекстного меню этого объекта выбрать пункт **Экспортировать**, что приведет к появлению в дереве постпроцессора объекта **От цилиндр группы**, который и используется для построения требуемого слоя. На объекте **От цилиндр группы** необходимо создать слой характеристик.

**3.8. Визуализация векторного поля скорости.** Для показа направлений скорости методом векторов (рис. 22) из контекстного меню основной плоскости задачи необходимо выбрать пункт **Создать слой**; в раскрывающемся списке **Переменная** задать **Скорость**, в списке **Метод** – **Векторы**.

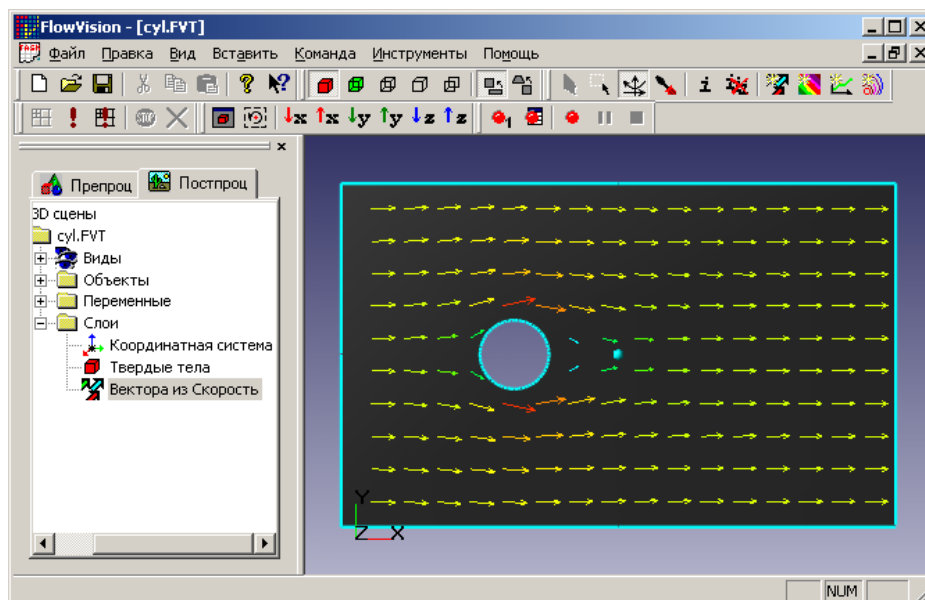


Рис. 22

Во вкладке **Начальные точки** (рис. 23) рекомендуется уменьшить число точек, из которых будут выходить векторы (параметр *Частота узлов по i-му орту*), до 30–80. Если слой будет просматриваться в отсутствие слоя Заливка, то лучше оставить без изменений цвета векторов, которые по умолчанию соответствуют значениям модуля скорости. В противном случае рекомендуется изменить цвет векторов на черный или белый, выбрав во вкладке **Покрытие** из списка **Переменная** какую-либо константную переменную (например, Плотность) и дважды щелкнув на верхней (красной) строке цветовой палитры для изменения цвета.

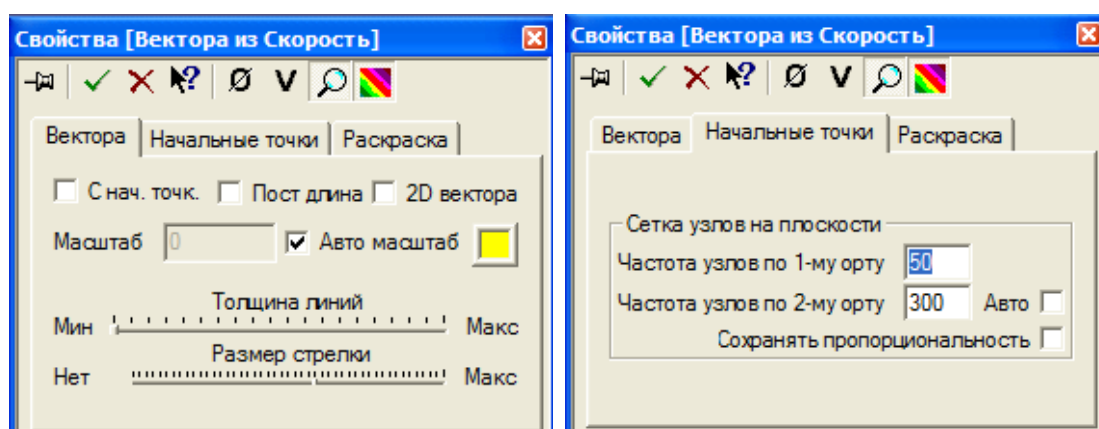


Рис. 23

Процедура построения линий тока методом группы частиц позволяет воспроизвести анимационную картинку движения частиц со скоростью жидкости (рис. 24), которые оставляют следы, совпадающие с линиями тока.

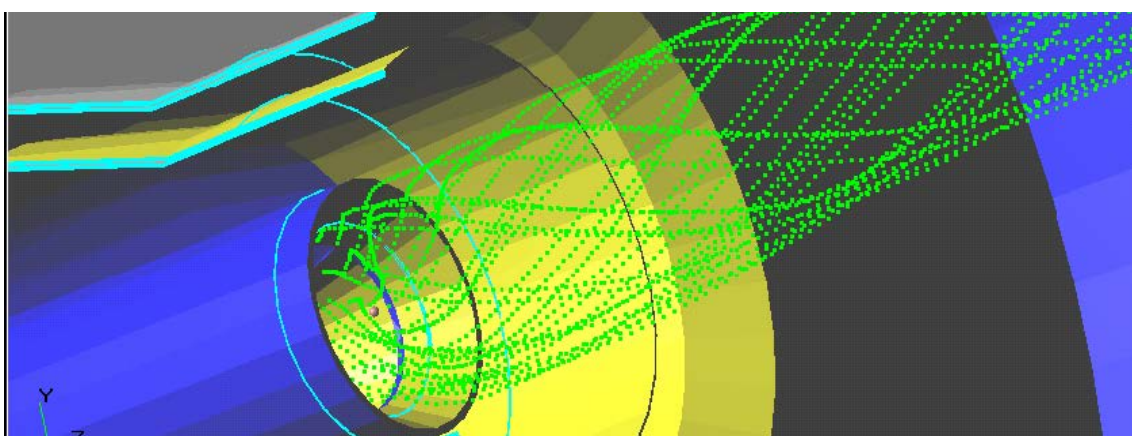


Рис. 24

Из контекстного меню основной плоскости задачи необходимо выбрать пункт **Создать слой**; в раскрывающемся списке **Переменная** задать **Скорость**, в списке **Метод** – **Группа частиц**. Во вкладке **Начальные точки** рекомендуется уменьшить число точек, из которых будут выходить линии тока (параметр *Частота узлов*), до 30–80 по каждому орту. Во вкладке **Частицы** (рис. 25) уменьшить *Число шагов* до 20–100 (это определяет длину следа от частицы). Цвет частиц рекомендуется сделать черным или белым, чтобы они были видны во всей области даже при наличии слоя **Заливка**.

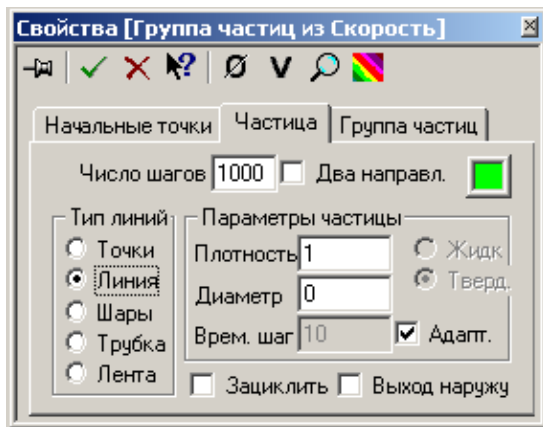



Рис. 25

**3.9 Представление результатов и подготовка отчета.** Отчет о проделанной работе рекомендуется оформлять с использованием текстового редактора **Microsoft Word**. По любой задаче, решенной с помощью пакета **Flow Vision**, в отчете представляется следующий набор результатов:

- картина течения с распределением значений скорости или давления (слой визуализации **Заливка** – рисунок в формате \*.bmp) и соответствующие комментарии. Рисунок в формате \*.bmp можно получить, не выходя из пакета Flow Vision, воспользовавшись кнопкой **Захватить графическое окно** ;
- картина течения с линиями тока (слой визуализации **Группа частиц** или **Векторы**) и соответствующие пояснения;
- полученные в результате расчета интегральные характеристики, которые должны быть представлены в сравнении с теорией (таблица, содержащая информацию о граничных, начальных условиях, результаты численного расчета и теории). Объяснения совпадения или расхождения численного эксперимента с теорией или экспериментом;
- картина течения с двумерными графиками, полученными в ходе расчетов (слой визуализации **Двумерный график**), и соответствующие комментарии или график, построенный в другом математическом или графическом пакете на основе файлов, полученных в результате сохранения динамики изменения значений каких-либо переменных.

## II. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Лабораторная работа № 1

#### ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ПРЯМОМ ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

##### Цель работы:

1) моделирование плоского ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале, наблюдение за динамикой его установления и анализ установившегося течения;

2) нахождение профиля скорости и границ применимости теоретического расчета уравнения распределения скорости по высоте пластины.

##### Теоретическая часть

Движение вязкой жидкости между двумя плоскостями  $z = \pm h$  можно представить как предельный случай течения в канале прямоугольного сечения при условии, если одну сторону прямоугольника принять равной  $2h$ , а другую устремить к бесконечности. В этом смысле рассматриваемое течение может быть названо течением в плоской трубе. Для анализируемой модели от нуля отлична только компонента вектора скорости  $\vec{u}$  вдоль оси  $x$ , которую будем обозначать  $u$ .

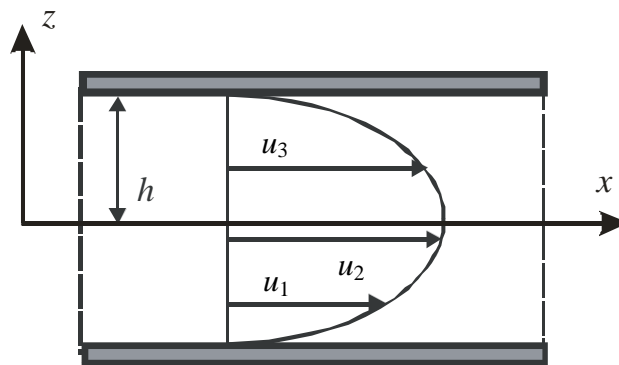


Рис. 26

Для стационарного случая и при  $\mu = \text{const}$ , если в качестве граничных условий рассматривать условие прилипания частиц жидкости на стенки канала  $u = 0$  при  $z = \pm h$ , то имеем уравнение распределение скорости по высоте пластины:

$$u = \frac{\Delta p h^2}{2\mu l} \left[ 1 - \left( \frac{z}{h} \right)^2 \right].$$

Таким образом, в стационарном случае поперечный профиль скорости вдоль оси канала описывается параболой, при этом максимальное значение скорости

$$u_{\max} = \frac{1}{2\mu} \frac{\Delta p h^2}{l}.$$

Течение принимает свою окончательную форму (профиль скорости становится параболическим) на некотором расстоянии от начала канала:

$$l_{\text{нач}} = 0,029 h \text{Re}.$$

Важной характеристикой рассматриваемого течения является средняя по сечению скорость:

$$u_{\text{ср}} = \frac{Q}{2h\mu} = \frac{1}{3} \frac{\Delta p h^2}{3l} = \frac{2}{3} u_{\max}.$$

### Постановка задачи

Вязкая несжимаемая жидкость течет между двумя плоскостями, находящимися на расстоянии 0,1 м, длина канала 2 м. Давление на входе в канал  $p = 0,06 - 0,001N$  Па.

### Моделирование

1. Загрузите **FlowVision**.
2. Выберите **Создать** в меню **Файл**.
3. Выберите файл `D:\Samples\Geom\Plate.wrl`.
4. Выберите расчетную модель. В данной задаче решаются уравнения Навье – Стокса для ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости – воды.
5. Введите физические параметры: плотность  $1000 \text{ кг/м}^3$  и вязкость (**Молекулярная вязкость**)  $10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .
6. Перегруппируйте геометрию: **угол перегруппировки** =  $90^\circ$ .
7. Введите **Граничные условия**.

На передней и задней гранях ставится условие Стенки с проскальзыванием, на верхней и нижней (вдоль оси  $z$ ) гранях – условие Стенки (без проскальзывания).

На правой грани (у выхода из канала) – условие свободного вытекания с нулевым давлением (тип границы – Свободный выход, тип граничного условия – Нулевое давление/Выход).

На левой грани (у входа в канал) тип границы – Вход/Выход; при этом следует ставить граничное условие с заданным давлением  $p = 0,06 - 0,001N$  Па.

8. Создайте расчетную сетку: число ячеек в горизонтальном направлении (вдоль оси  $y$ ) 40, в вертикальном (вдоль оси  $z$ ) 20, в глубину 10.

9. Выполните предварительный и окончательный расчет задачи.

### Представление и анализ результатов

1. В **Постпроцессоре** создайте три вертикальные линии на разном расстоянии от входа в канал ( $Y_0 = -0,5; 0; 0,5; Z_0 = 0$ ).

2. На каждой линии постройте двумерный график  $Y$ -компоненты скорости. Для каждого графика на вертикальных линиях нужно выбрать одинаковую длину оси Функция 0,25 (в данном случае) и, возможно, изменить ориентацию плоскости Функция на  $90^\circ$  или  $270^\circ$ .

3. Создайте новую переменную, характеризующую распределение скорости:

$$v = \frac{p}{(1+y)0,2} \left[ 1 - \left( \frac{z - 0,05}{0,05} \right)^2 \right].$$

4. На каждой вертикальной линии постройте двумерный график новой переменной.

5. Сравните значения максимальной и средней скорости в различных сечениях с их теоретическими значениями при граничных условиях на скорость. Объясните расхождение.

6. Для определения границ применимости теоретического решения необходимо найти расстояние от входа в канал до сечения канала, в котором профиль становится параболическим.

# Лабораторная работа № 2

## ЛАМИНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

### Цель работы:

- 1) моделирование ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе;
- 2) нахождение теоретической и действительной потерь напора по длине.

### Теоретическая часть

Движение жидкости в трубах и каналах характеризуется двумя режимами: ламинарным и турбулентным. При *ламинарном режиме* жидкость движется параллельными слоями или струйками. При *турбулентном режиме* движение частиц жидкости происходит по сложным траекториям и является хаотическим, в потоке наблюдается интенсивное перемешивание частиц жидкости, сопровождающееся пульсациями скоростей и давлений.

На основе опытов Рейнольдс предложил безразмерное соотношение, названное *числом Рейнольдса*, которое позволяет установить режим движения жидкости. Для цилиндрической трубы

$$Re = \frac{vd}{\nu},$$

где  $v$  – средняя скорость движения жидкости;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости.

При числах  $Re < 2320$  имеет место ламинарный режим, а при  $Re > 2320$  – турбулентный.

При движении потока реальной жидкости возникают силы гидравлического сопротивления (трения), тормозящие движение. На преодоление сил сопротивления затрачивается часть удельной энергии потока жидкости, которая называется *потерей напора*.

Потери напора на участке равномерного потока ( $d = \text{const}$ ) называются потерями напора по длине  $h_{\text{дл}}$ . При теоретических расчетах величину потерь напора по длине определяют по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$



где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси);  $l$  – длина трубопровода;  $d$  – внутренний диаметр;  $v$  – средняя скорость потока;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Коэффициент  $\lambda$  зависит от режима движения жидкости (числа  $Re$ ), относительной шероховатости ( $\varepsilon = \Delta_s / d$ , где  $\Delta_s$  – эквивалентная абсолютная шероховатость стенок трубы, которая по гидравлическому сопротивлению равноценна абсолютной шероховатости; ее численные значения для труб, изготовленных из различных материалов, приводятся в справочной литературе). Влияние указанных факторов на величину коэффициента  $\lambda$  при различных режимах проявляется по-разному.

При ламинарном режиме ( $Re < 2320$ ) шероховатость стенок не оказывает влияния на сопротивление движению и  $\lambda = f(Re)$ . В этом случае  $\lambda$  определяется по формуле

$$\lambda = \frac{64}{Re}.$$

При турбулентном режиме на величину  $\lambda$  оказывают влияние два фактора: число  $Re$  и относительная шероховатость  $\varepsilon$ . Для определения  $\lambda$  можно пользоваться формулой Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left( \varepsilon + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}.$$

### Постановка задачи

Длина трубы  $L = 2$  м, диаметр  $d = 0,02$  м. Плотность воды  $\rho_v = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость  $\mu = 0,001$  кг/м · с.

Средняя скорость на входе  $v = 0,04 - 0,001N$  м/с.

### Моделирование

1. Загрузите **FlowVision**.
2. Выберите **Открыть** в меню **Файл**.
3. Выберите файл  $D:\Samples\Geom\Tube\_lam.wrl$ .
4. Выберите **Модель**, отметьте уравнение Навье – Стокса.
5. Задайте **Начальные значения**, **zСкорость** =  $v$  м/с.
6. Задайте свойства среды: **Плотность** =  $\rho_v$ , **Молекулярная вязкость** =  $\mu$ .
7. **Параметры метода** оставьте по умолчанию.
8. Задайте **Граничные условия**.

Граница 1: тип – Стенка; Тип граничного условия – Стенка.

Граница 2: тип – Вход/Выход, **Скорость**, Тип граничного условия – Нормальная скорость :

$$u = 2v \left[ 1 - \frac{x^2 + y^2}{0,0001} \right].$$

Граница 3: тип – Свободный выход; Тип граничного условия – Нулевое давление/Выход.

9. Задание начальной расчетной сетки. Введите количество сеточных интервалов 20 для каждой из осей (X, Y, Z) в окошко, расположенное справа от кнопки **Равном.**, и нажмите на эту кнопку.

10. Выполните предварительный и окончательный расчет задачи.

### **Представление и анализ результатов**

1. Кликните правой кнопкой мыши на элементе **Шаблон Плоскости** в папке **Объекты** в **Постпроцессоре**.

2. Выберите **Создать слой** в контекстном меню.

3. Задайте **Переменная** = Давление.

4. Задайте **Метод** = Двумерный график.

Задайте следующие настройки в окне свойств: Ориентация угол – 270°, число отрезков – 100.

5. Проверьте достоверность модели расчетом по формуле Дарси – Вейсбаха потерь напора по длине.

# Лабораторная работа № 3

## ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

### Цель работы:

- 1) моделирование турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе;
- 2) нахождение профиля скорости и границ применимости теоретического расчета уравнения распределения скорости по сечению трубы.

### Теоретическая часть

Турбулентное движение является наиболее распространенным в природе и технике и представляет собой одно из сложнейших гидравлических явлений. Несмотря на многочисленные исследования, строгая теория для такого движения до сих пор не создана, поэтому при решении практических задач наряду с применением отдельных полуэмпирических теорий широко используют экспериментальные данные и эмпирические формулы.

При  $Re > Re_{кр}$  нарушается устойчивость ламинарного движения, возрастают поперечные составляющие скоростей частиц, приводящие к хаотическому движению частиц в потоке (последние могут переходить из одной структуры в другую, вызывая тем самым перемешивание). Интенсивность перемешивания частиц жидкости зависит от числа Рейнольдса, т. е. при сохранении прочих условий от скорости движения жидкости. В периферийных слоях потока жидкости из-за значительных касательных напряжений скорости всегда будут минимальными и режим движения будет ламинарным. Увеличение скорости до критического значения приведет к смене режима движения жидкости с ламинарного на турбулентный. Таким образом, поток жидкости состоит из ламинарной зоны (у стенки канала) и турбулентного ядра течения (в центре) (рис. 27).

Поскольку скорость к центру турбулентного потока нарастает интенсивно, то толщина периферийного ламинарного слоя чаще всего незначительна ( $\delta \leq R / 60$ ) и зависит от скорости движения жидкости.

$$\delta = \frac{30\nu}{v\sqrt{\lambda}} = \frac{30d}{Re\sqrt{\lambda}}.$$

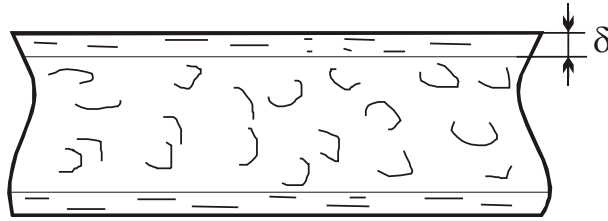


Рис. 27

Наблюдения за величинами осредненных скоростей в турбулентном потоке жидкости показали, что практически скорости в разных точках живого сечения равны средней скорости. Сопоставление эпюр скоростей (рис. 28) турбулентного потока 1 и ламинарного потока 2 позволяет сделать вывод о практически равномерном распределении скоростей в живом сечении турбулентного потока.

На основании работ Прандтля, а также обобщений многочисленных экспериментальных исследований других ученых было установлено, что закон изменения скоростей по сечению турбулентного потока близок к логарифмическому закону.

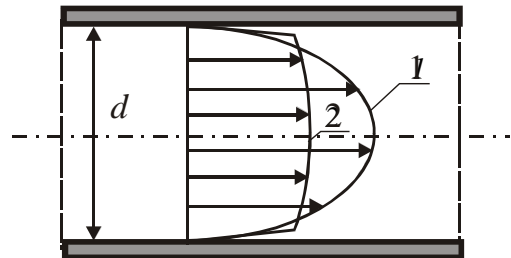


Рис. 28

И. Никурадзе, исходя из опытов, была предложена следующая формула по распределению скорости в трубах круглого сечения:

$$u = v_* \left( 2,5 \ln \frac{zv_*}{\nu} + C \right),$$

где  $v_* = \sqrt{\tau_{ст} / \rho} = \nu \sqrt{\lambda / 8}$  – динамическая скорость;  $z$  – расстояние от поверхности трубы;  $C = 5,5$  при  $4 \cdot 10^3 < Re < 3,24 \cdot 10^6$ ,  $C = 8,48$  при  $Re > 3,24 \cdot 10^6$ .

Более универсальной зависимостью, описывающей закон изменения скорости, является уравнение, полученное Альтшулем:

$$u = u_{\max} \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^{0,9\sqrt{\lambda}}.$$

Им же получены простые расчетные зависимости для определения отношения средней скорости к максимальной:

$$\frac{v}{u_{\max}} = \frac{1}{1 + 1,35\sqrt{\lambda}}.$$

### Постановка задачи

Задача состоит в моделировании ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе, наблюдении за динамикой его установления и анализе установившегося течения.

Длина трубы  $L = 2$  м, диаметр  $d = 0,02$  м. Плотность воды  $\rho_v = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость  $\mu = 0,001$  кг/м · с. Скорость на входе  $v = 50 + N$  м/с.

### Моделирование

1. Загрузите **FlowVision**.
2. Выберите **Создать** в меню **Файл**.
3. Выберите файл D:\ Samples\Geom\Tube\_lam.wrl.
4. Выберите **Модель – Несжимаемая жидкость**, отметьте уравнение Навье – Стокса и уравнение переноса турбулентных функций.
5. Задайте **Начальные значения**, **zСкорость** =  $v$  м/с, пульсации – 0,01, масштаб турбулентности –  $d / 10$ .
6. Задайте свойства среды: **Плотность** =  $\rho_v$ , **Молекулярная вязкость** =  $\mu$ .
7. Задайте **Общие параметры, шаги**: неявная схема, фиксированный шаг –  $0,1l / v$ .
8. Задайте **Граничные условия**.  
Граница 1: тип – Стенка, Тип граничного условия – Стенка, логарифмический закон, Шероховатость = 0.  
Граница 2: тип – Вход/Выход, **Скорость**, Тип граничного условия – Нормальная скорость =  $v$ , **ТурбЭнергия**, Тип граничного условия – Пульсация, Пульсация = 0,01, **ТурбДиссипация**, Тип граничного условия – Масштаб турбулентности, Масштаб =  $d / 10$ .
- Граница 3: тип – Свободный выход, Тип граничного условия – Нулевое давление/Выход.
9. Задание начальной расчетной сетки. Введите количество сеточных интервалов 20 для каждой из осей ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) в окошко, расположенное справа от кнопки **Равном**. и нажмите на эту кнопку.
10. Выполните предварительный и окончательный расчет задачи.

## Представление и анализ результатов

1. В **Постпроцессоре** создайте горизонтальную линию на оси канала и вертикальную линию в центре трубы.

2. Постройте двумерный график (график давления на горизонтальной линии и график Z-компоненты скорости на вертикальных линиях).

3. Создайте новую переменную, характеризующую распределение скорости по формуле Альтшуля

$$u = v(1 + 1,35\sqrt{\lambda}) \left(1 - \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}\right)^{0,9\sqrt{\lambda}}, \quad \lambda = \frac{2 \Delta p d}{l v^2 \rho}.$$

4. Постройте двумерный график новой переменной.

5. Для каждого графика на вертикальных линиях нужно выбрать одинаковую длину оси Функция 0,25 (в данном случае) и, возможно, изменить ориентацию плоскости Функция на 90° или 270°.

6. Сравните значения максимальной и средней скорости в различных сечениях с их теоретическими значениями при граничных условиях на скорость. Объясните расхождение.

# Лабораторная работа № 4

## ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ СЛАБОСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В СМЕСИТЕЛЕ

### Цель работы:

- 1) моделирование смешения двух невязких сжимаемых жидкостей в смесителе;
- 2) нахождение скорости и средней температуры смешанного потока на выходе из смесителя.

### Теоретическая часть

*Смесительный теплообменник* (рис. 29) представляет собой устройство, которое осуществляет передачу энергии таким образом, что жидкие среды в теплообменном и массообменном процессе смешиваются. Устройство смесительного теплообменника намного проще, чем поверхностного. Смесительный теплообменник более полноценно использует тепло, но его можно применять только в допустимых технологических условиях. Смесительный теплообменник, как правило, используется в различных установках утилизации отработанного пара, тепла, дымовых газов и некотором другом оборудовании.

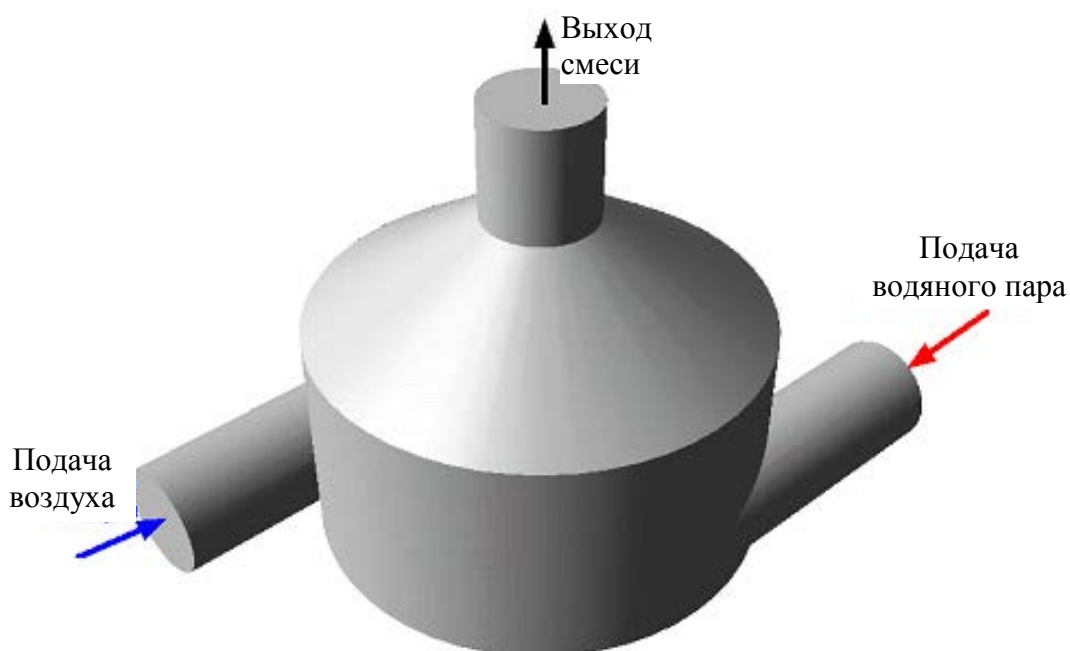


Рис. 29

Скорость потока на выходе из смесителя определяется из условия равенства массовых расходов на входе и выходе:

$$v = \frac{G_1 S_{\text{ВХ1}} + G_2 S_{\text{ВХ2}}}{S_{\text{ВЫХ}} \rho_{\text{ВЫХ}}},$$

где  $G$  – удельный массовый расход,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $S_{\text{ВХ}}$ ,  $S_{\text{ВЫХ}}$  – сечение входа и выхода,  $\text{м}^2$ .

Температура потока на выходе из смесителя определяется из теплового баланса:

$$t_{\text{ВЫХ}} = \frac{G_1 c_{\text{ВХ1}} S_{\text{ВХ1}} t_1 + G_2 c_{\text{ВХ2}} S_{\text{ВХ2}} t_2}{S_{\text{ВЫХ}} c_{\text{ВЫХ}} (G_1 + G_2)},$$

где  $c_{\text{ВХ}}$ ,  $c_{\text{ВЫХ}}$  – массовая теплоемкость потока на входе и выходе,  $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}$ .

### Постановка задачи

В смесителе осуществляется смешение воздуха при температуре  $t_{\text{в}} = 20^\circ\text{С}$  и водяного пара при температуре  $t_{\text{п}} = 120 + N^\circ\text{С}$ . Удельный массовый расход воздуха и водяного пара одинаков  $G = 10 + 0,5N \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ .

### Моделирование

1. Загрузите **FlowVision**.
2. Выберите файл  $D:\text{Samples}\text{Geom}\text{Mixer.wrl}$ .
3. Выберите **Модель – Слабосжимаемая жидкость**, отметьте уравнение Навье – Стокса и уравнение переноса турбулентных функций, уравнение массопереноса (концентрация).
4. Задайте **Начальные значения**, пульсации – 0,03, масштаб турбулентности – 0,001.
5. Задайте свойства среды: **Вещество0:** для воздуха, **Вещество1:** для водяного пара.
6. Задайте **Общие параметры, шаги:** неявная схема,  $\text{КФЛ} = 100$ .
7. Задайте **Граничные условия**.  
Граница 0: тип – Стенка, **Концентрация**, Тип граничного условия – Нулевой поток, **Скорость**, Тип граничного условия – Стенка, логарифмический закон, Шероховатость = 0.  
Граница 1: тип – Вход/Выход, **Концентрация**, Тип граничного условия – Значение на стенке, Значение на стенке = 0; **Скорость**, Тип



граничного условия – Нормальная массовая скорость =  $G$ ; **Температура**, Тип граничного условия – Значение на стенке, Значение на стенке =  $t_w$ ; **ТурбЭнергия**, Тип граничного условия – Пульсация, Пульсация = 0,03; **ТурбДиссипация**, Тип граничного условия – Масштаб турбулентности, Масштаб = 0,001.

Граница 2: тип – Вход/Выход, **Концентрация**, Тип граничного условия – Значение на стенке, Значение на стенке = 1; **Скорость**, Тип граничного условия – Нормальная массовая скорость =  $G$ ; **Температура**, Тип граничного условия – Значение на стенке, Значение на стенке =  $t_w$ ; **ТурбЭнергия**, Тип граничного условия – Пульсация, Пульсация = 0,03; **ТурбДиссипация**, Тип граничного условия – Масштаб турбулентности, Масштаб = 0,001.

Граница 3: тип – Свободный выход, Тип граничного условия – Нулевое давление/Выход.

8. Откройте папку **Геометрия**, задайте граничные условия.

9. Задание начальной расчетной сетки. Введите количество сеточных интервалов 20, 20, 30 для каждой из осей ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ).

10. Выполните предварительный и окончательный расчет задачи.

### **Представление и анализ результатов**

1. Визуализация результатов расчета.

2. **Заливка** по Концентрации на **Шаблоне Плоскости**.

3. **Заливка** по Концентрации на **Плоскости** ( $Y_0 = 0,005$  и Нормальный вектор  $Y$ ).

4. Определите скорость, температуру и плотность потока на **Выходе**.

5. Проверьте достоверность модели.

# Лабораторная работа № 5

## ОБТЕКАНИЕ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ ЛОПАСТИ ВЕТРОВОГО КОЛЕСА

### Цель работы:

- 1) моделирование турбулентного течения невязкой сжимаемой жидкости при обтекании объекта. Наблюдение за динамикой его установления и анализ установившегося течения;
- 2) определение подъемной силы, действующей на лопасть ветрового колеса для различных углов атаки воздушного потока.

### Теоретическая часть

В лопастных ветроэнергетических установках энергия ветра преобразуется в механическую энергию их рабочих органов. Первичным рабочим органом, преобразующим энергию ветра в кинетическую энергию своего вращения, является ветроколесо. Крыльчатые ветроколеса работают за счет косо́го удара при движении лопастей перпендикулярно направлению скорости ветра (рис. 30).

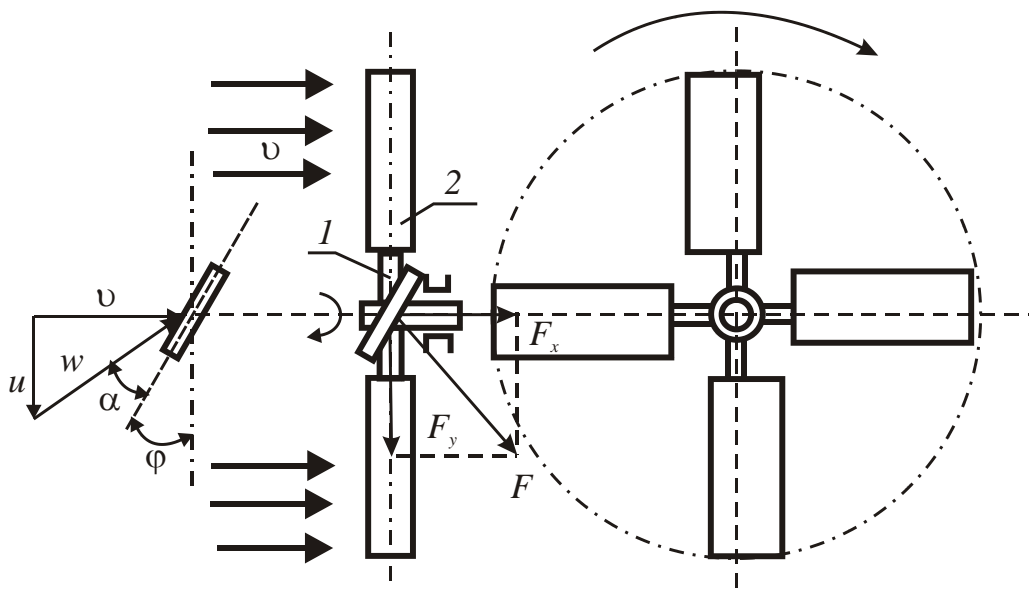


Рис. 30

На горизонтальном валу закреплены лопасти, число которых у современных ветродвигателей бывает от двух и больше. Лопасть ветроколеса 2 закреплена на махе 1 так, что образует с плоскостью вращения некоторый угол  $\phi$ , который называют *углом установки лопасти*.

При этом на лопасть набегаёт воздушный поток с относительной скоростью  $w$  под углом  $\alpha$ , который называют **углом атаки**, и действует с силой  $F$ . Для неподвижной лопасти  $\varphi + \alpha = 90^\circ$ . Углы  $\varphi$  и  $\alpha$  в значительной мере определяют эффективность крыльев. Силу  $F$  можно разложить на две составляющие: вдоль скорости набегающего потока, называемая силой лобового сопротивления  $F_x$ , и в направлении, перпендикулярном скорости набегающего потока, называемая подъёмной силой  $F_y$ . Сила  $F_y$  действует в плоскости вращения ветроколеса и создаёт крутящий момент.

Подъёмную силу лопасти можно выразить равенством, применяемым в аэродинамике:

$$F_y = \frac{C_y \rho_v S v^2 \sin \varphi}{2},$$

где  $C_y$  – безразмерный коэффициент подъёмной силы, зависящий в общем случае от формы лопасти и её ориентации в потоке воздуха;  $\rho_v$  – плотность ветрового потока,  $\text{кг/м}^3$ ;  $S$  – площадь лопасти,  $\text{м}^2$ ;  $v$  – скорость набегающего на лопасть ветрового потока,  $\text{м/с}$ .

Значение  $C_y$  определяют теоретическим расчётом или экспериментально. Так, согласно теории Жуковского, для лопасти в плоскопараллельном потоке при небольших углах атаки

$$C_y = \frac{0,11}{1 + 2S/b^2} (\alpha + \alpha_0),$$

где  $b$  – высота лопасти,  $\text{м}$ ;  $\alpha_0$  – угол атаки, при котором подъёмная сила равна нулю.

### Постановка задачи

Обтекание лопасти ветрового колеса потоком воздуха со скоростью  $v = 4 + 0,2N$   $\text{м/с}$ . Плотность воздуха  $\rho_v = 1,29$   $\text{кг/м}^3$ , динамическая вязкость  $\mu = 0,0000182$   $\text{кг/м} \cdot \text{с}$ . Давление на бесконечности  $p = 101\,000$   $\text{Па}$ , температура на бесконечности  $T = 273$   $\text{К}$ .

### Моделирование

1. Загрузите **FlowVision**.
2. Выберите файл `D:\Samples\Geom\NACA0012.STL`.
3. Выберите **Модель – Полностью сжимаемая жидкость**, отметьте уравнение Навье – Стокса и уравнение переноса турбулентных функций.

4. Задайте **Начальные значения**:  $x$ Скорость =  $v$  м/с, пульсации – 0,01, масштаб турбулентности – 0,01.

5. Параметры модели: Общие, Давл. минимум, Па = 100 Па.

6. Задайте свойства среды: **Вещество0**, Плотность = Закон идеального газа, Молекулярная вязкость = 0,0000182 кг/м · с.

7. Задайте **Общие параметры, шаги**: неявная схема, введите Фикс. шаг = 0,00001 с.

8. Задайте **Граничные условия**.

Граница 0: тип – Стенка; **Температура**, Тип граничного условия – Нулевой поток; **Скорость**, Тип граничного условия – Стенка, логарифмический закон, Шероховатость = 0.

Граница 1: тип – Симметрия; **Температура**, Тип граничного условия – Симметрия; **Скорость**, Тип граничного условия – Стенка с проскальзыванием; **ТурбЭнергия**, Тип граничного условия – Симметрия; **ТурбДиссипация**, Тип граничного условия – Симметрия.

Граница 2: тип – Вход/Выход; **Температура**, Тип граничного условия – Значение на стенке, Значение на стенке = 0; **Скорость**, Тип граничного условия – Нормальная скорость с давлением, Скорость =  $v$ , Давление = 0; **ТурбЭнергия**, Тип граничного условия – Пульсация, Пульсация = 0,01; **ТурбДиссипация**, Тип граничного условия – Масштаб турбулентности, Масштаб = 0,01.

Граница 3: тип – Свободный выход; **Температура**, Тип граничного условия – Нулевой поток; **Скорость**, Тип граничного условия – Нулевое давление/Выход.

9. Откройте папку **Геометрия**, задайте граничные условия.

10. Задание начальной расчетной сетки. Введите количество сеточных интервалов 97, 38, 2 для каждой из осей ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ).

11. Задайте на закладке **Шаги**: поставьте метку в поле **Фикс. шаг**, Фикс. шаг = 0,00001 с.

12. Выполните предварительный и окончательный расчет задачи.

### Представление и анализ результатов

1. Создайте График вдоль кривой по давлению.

2. Определите подъемную силу, действующую на лопасть при углах атаки ветрового потока  $\alpha = -10, -5, 0, 5, 10^\circ$ .

3. Проверьте достоверность модели путем построения теоретической и расчетной зависимости подъемной силы от угла атаки.

# Лабораторная работа № 6

## РАБОТА ВОДЯНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

### Цель работы:

- 1) моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости в корпусе центробежного насоса;
- 2) нахождение полного напора центробежного насоса и границ применимости теоретического расчета по уравнению Эйлера.

### Теоретическая часть

В центробежных насосах перемещение жидкости осуществляется под действием центробежных сил (рис. 31, *a*). При вращении рабочего колеса *1* жидкость начинает вращаться вместе с колесом и приобретает при этом значительную кинетическую энергию. Затем под действием центробежной силы жидкость перемещается из центральной части насоса вдоль лопаток к корпусу *2*, выполненному в виде спирального отвода, где происходит преобразование кинетической энергии потока в потенциальную. Затем жидкость поступает в нагнетательную линию *3*. Дальнейшее заполнение насоса осуществляется из всасывающей линии *4* за счет вакуума, который образуется во входной части насоса.

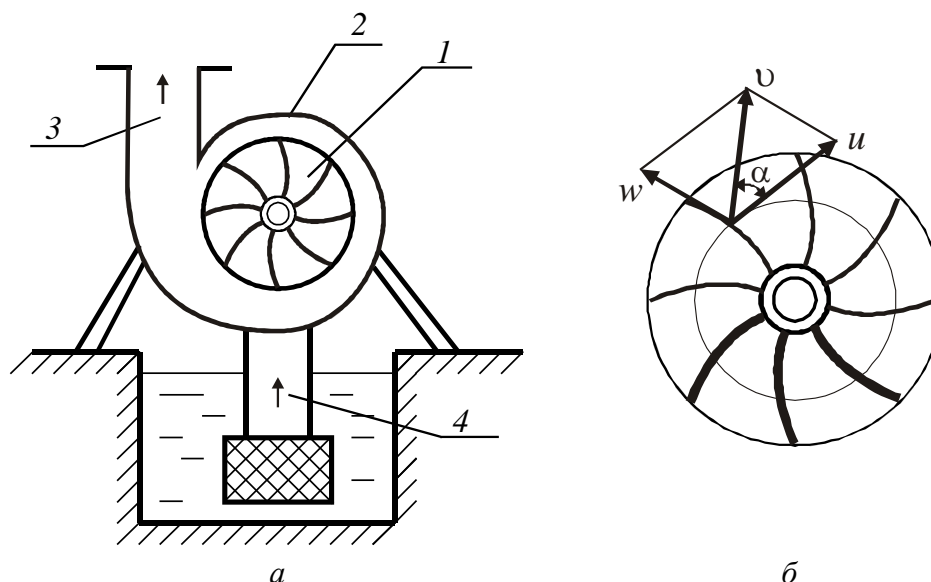


Рис. 31

Действительный напор, создаваемый насосом, можно определить по формуле

$$H_d = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g},$$

где  $p_1, p_2$  – давление потока на входе и на выходе из рабочего колеса, Па;  $v_1, v_2$  – средняя абсолютная скорость потока на входе и на выходе из рабочего колеса, м/с;  $\rho$  – плотность жидкости, м<sup>3</sup>/с.

Действительный напор всегда меньше теоретического из-за конечного числа лопаток и потерь на преодоление гидравлических сопротивлений при движении жидкости в насосе.

Основное уравнение центробежного насоса (уравнение Эйлера), определяющее связь между теоретическим напором и кинематическими показателями потока жидкости, протекающей через рабочее колесо, имеет вид

$$H_{\text{т.о.}} = \frac{v_2 u_2 \cos \alpha_2 - v_1 u_1 \cos \alpha_1}{g},$$

где  $v$  – абсолютная скорость движения частиц жидкости между лопатками, которую можно определить как векторную сумму ее составляющих (рис. 31, б)  $\vec{v} = \vec{u} + \vec{w}$ ;  $u$  – окружная скорость, или скорость переносного движения, т. е. скорость, с которой жидкость вращается вместе с рабочим колесом (направлена по касательной к окружности в сторону вращения  $u = \omega r$ , где  $w$  – относительная скорость, т. е. скорость движения частиц жидкости относительно лопаток рабочего колеса (направлена по касательной к лопатке рабочего колеса от центра к окружности));  $\alpha$  – угол между направлениями абсолютной и переменной скоростей.

В данном уравнении при осевом подводе жидкости к рабочему колесу  $\alpha_1 = 90^\circ$ . Тогда теоретический напор рабочего колеса

$$H_{\text{т.о.}} = \frac{v_2 u_2 \cos \alpha_2}{g} = \frac{v_{u2} u_2}{g},$$

$$v_{u2} = \sqrt{v_2^2 - \left( \frac{Q}{S_{\text{ВЫХ}}} \right)^2}, \quad u_2 = \pi D n,$$

где  $Q$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/с;  $S_{\text{ВЫХ}}$  – площадь сечения на выходе из рабочего колеса, м<sup>2</sup>;  $D$  – диаметр рабочего колеса, м;  $n$  – частота вращения рабочего колеса, с<sup>-1</sup>.

Тогда к. п. д. насоса

$$\eta = \frac{H_d}{H_{\text{т.о.}}}.$$

## Постановка задачи

Наружный диаметр рабочего колеса  $d = 0,4$  м, частота вращения  $n = 1500$  об/мин. Плотность воды  $\rho_v = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость  $\mu = 0,001$  кг/м · с. Подача воды  $Q = 0,03 + 0,001N$  м<sup>3</sup>/с.

## Моделирование

В этом примере моделируется турбулентное вязкое движение несжимаемой жидкости между лопатками вращающегося ротора.

Геометрия – Rotor\_whole.wrl (рис. 32, а). Размеры расчетной области  $0,1 \times 0,1 \times 0,2$  м.

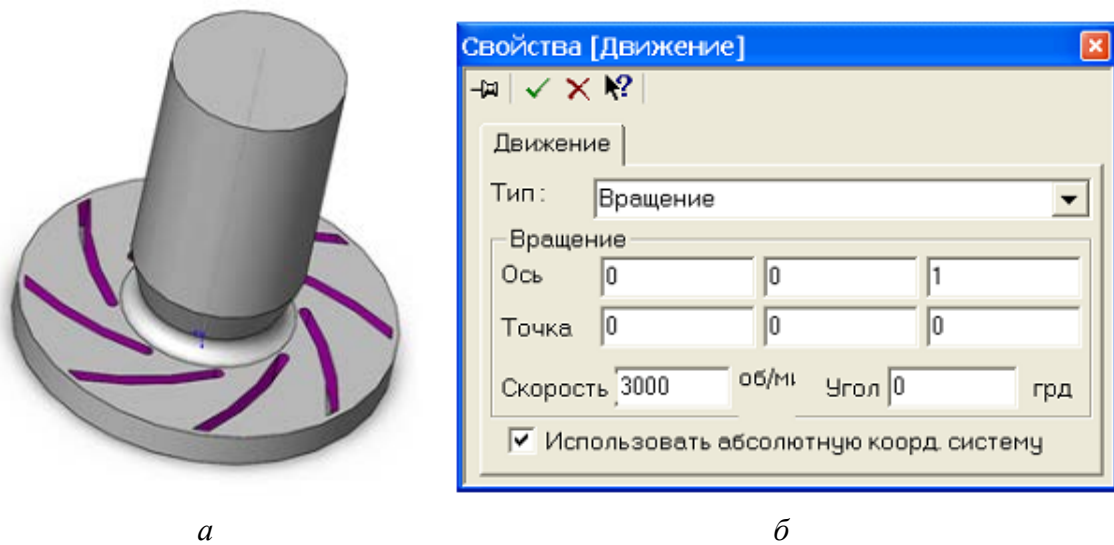


Рис. 32

1. В окне Выбор модели: **Модель** – Несжимаемая жидкость, уравнения – Скорость и Турбулентность.

2. Начальные значения: пульсация = 0,01; Масштаб турбулентности = 0,01;

3. Вещество0: плотность = 1000 кг/м<sup>3</sup>; молекулярная вязкость = 0,001 кг/м · с.

4. Задайте параметры в окне свойств **Движение** (рис. 32, б).

5. Граница 1: тип – Вход/Выход; **Скорость**, Тип граничного условия – Нормальная скорость, Скорость =  $Q / S$  м/с; **ТурбЭнергия**, Тип граничного условия – Пульсация, Пульсация = 0,01; **ТурбДиссипация**, Тип граничного условия – Масштаб турбулентности, Масштаб = 0,01 м (1/10 диаметра канала).

Граница 2: тип – Стенка; **Скорость**, Тип граничного условия – Вращающаяся стенка, логарифмический закон, Шероховатость = 0; **ТурбЭнергия**, Тип граничного условия – Значение в ячейке рядом со стенкой; **ТурбДиссипация**, Тип граничного условия – Значение в ячейке рядом со стенкой.

Граница 3: тип – Свободный выход; **Скорость**, Тип граничного условия – Нулевое давление/Выход; **ТурбЭнергия**, Тип граничного условия – Нулевой поток; **ТурбДиссипация**, Тип граничного условия – Нулевой поток.

6. Задайте начальную расчетную сетку 30×30×16.

7. Задайте на закладке **Шаги**: поставьте метку в поле **Фикс.шаг**, **Фикс.шаг** = 0,0001 с.

8. Выполните предварительный и окончательный расчет задачи.

### **Представление и анализ результатов**

1. Создайте слои: характеристики для Давления, вектора для Отн. скорости.

3. Определите к. п. д. насоса.



# Лабораторная работа № 7

## ОБТЕКАНИЕ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ ЦИЛИНДРА РОТОРНОЙ ВЕТРОУСТАНОВКИ

### Цель работы:

- 1) моделирование турбулентного течения невязкой сжимаемой жидкости при обтекании вращающегося цилиндра;
- 2) определение подъемной силы Магнуса, действующей на вращающееся тело.

### Теоретическая часть

Схема роторной ветроустановки на основе эффекта Магнуса представлена на рис. 33. На концах цилиндров  $l$  помещаются выступающие круглые диски, так как иначе воздух, проходящий за торцами цилиндра, засасывается в область потока с пониженным давлением и, возмущая поток, уменьшает поперечную силу. Затраты энергии на вращение цилиндров составляют 5–15% мощности ветроустановки.

При вращении цилиндра вокруг своей оси через некоторое время вблизи его поверхности из-за сил трения и вязкости молекулы воздуха начнут вращаться со скоростью поверхности цилиндра  $u$ .

Если на вращающийся цилиндр набегает поток воздуха со скоростью  $v$  в направлении, перпендикулярном оси цилиндра (рис. 34), то вокруг него возникает циркуляция  $v_\theta = -2v \sin \theta$ . При этом образуется избыточное давление воздуха на поверхности цилиндра, обусловленное взаимодействием двух потоков, которое определяется из уравнения Бернулли:

$$p = \frac{\rho v^2}{2} - \frac{\rho (u - v_\theta)^2}{2} = \frac{\rho v^2}{2} \left( 1 - \left( 2 \sin \theta + \frac{u}{v} \right)^2 \right).$$

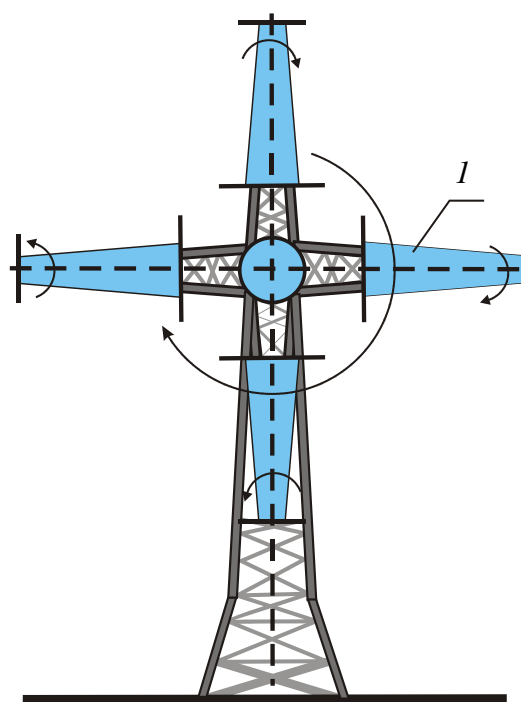


Рис. 33

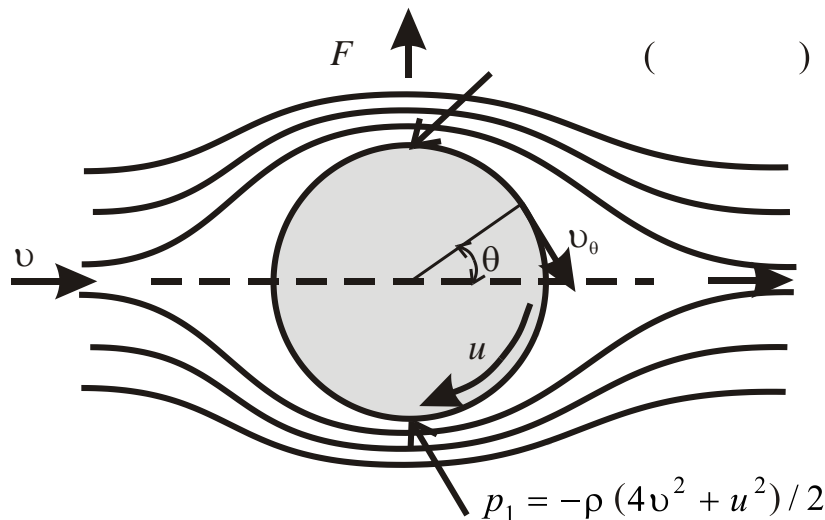


Рис. 34

Циркуляция вокруг цилиндра создает силу, действующую на него в направлении, перпендикулярном направлению потока, и называемую **поперечной силой**. Значение этой силы определяется путем интегрирования проекции удельной силы давления на вертикальную ось по контуру:

$$F = -lr \int_0^{2\pi} p \sin \theta d\theta = 2\pi r \rho u l .$$

Поперечная сила направлена всегда к той стороне вращающегося тела, на которой направления вращения тела и скорости потока совпадают. Это явление называется **эффектом Магнуса**, по имени ученого, впервые открывшего его в 1852 г.

### Постановка задачи

Обтекание цилиндра ветрового колеса потоком воздуха со скоростью  $v = 4 + 0,2N$  м/с. Плотность воздуха  $\rho_v = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость  $\mu = 0,0000182$  кг/м·с. Давление на бесконечности  $p = 101\,000$  Па, температура на бесконечности  $T = 273$  К.

### Моделирование

Геометрия для всей области – FloatingBox\_box.stl, для цилиндра – FalingBall\_domaih.stl. Размеры области 10×10×40 м. Размеры цилиндра: диаметр 1 м, длина 1 м.

1. Загрузите **FlowVision**.
2. Выберите файл D:\Samples\Geom\FloatingBox\_box.stl.

3. Выберите **Модель – Полностью сжимаемая жидкость**, отметьте уравнение Навье – Стокса и уравнение переноса турбулентных функций.
4. Задайте **Начальные значения**:  $x_{\text{Скорость}} = 0$  м/с, пульсации – 0,01, масштаб турбулентности – 0,01.
5. Параметры модели: Общие, Давл. минимум, Па = 100 Па.
6. Задайте свойства среды: **Вещество0**, Плотность = Закон идеального газа, Молекулярная вязкость = 0,0000182 кг/м · с.
7. Задайте **Общие параметры, шаги**: неявная схема, введите **Фикс.шаг** = 0,00001 с.
8. Задайте **Граничные условия**.
9. Задание цилиндра: нажмите правой кнопкой мыши на папке **Фильтры** и выберите в контекстном меню **Загрузить**; выберите файл D:\Samples\Geom\FalingBall\_domain.stl.
10. В папке Свойства фильтра задайте: закладка **Центр** – использовать центр инерции, **Центр инерции** = 0,5; 0,5; 0,5; закладка **Вращение** – выделить ось вращения, задайте обороты (об/мин).
11. На закладке **Шаги** поставьте метку в поле **Фикс.шаг**, **Фикс.шаг** = 0,00001 с.
12. Выполните предварительный и окончательный расчет задачи.

### Представление и анализ результатов

1. Создайте График вдоль кривой по давлению.
2. Определите подъемную силу, действующую на цилиндр при частоте вращения 2, 4, 6, 8, 10 об/с.
3. Постройте теоретическую и экспериментальную зависимость подъемной силы от частоты вращения.

# Лабораторная работа № 8

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В МНОГОСЛОЙНОЙ СТЕНКЕ

### Цель работы:

- 1) моделирование переноса тепла за счет теплопроводности материалов;
- 2) нахождение распределения температур в многослойной стенке.

### Теоретическая часть

Интенсивность переноса теплоты характеризуется плотностью теплового потока. **Мощность теплового потока**, или просто тепловой поток  $Q$ , Вт, – это количество теплоты, передаваемое в единицу времени через произвольную поверхность  $S$ . **Плотность теплового потока**  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, – это количество теплоты, передаваемое в единицу времени через единичную плотность поверхности:

$$q = \frac{Q}{S}.$$

Перенос теплоты зависит от распределения температуры по объему тела или пространства. **Температурным полем** называется совокупность мгновенных значений температуры во всех точках тела или системы тел в данный момент времени. Математическое описание температурного поля имеет вид

$$t = f(x, y, z, \tau),$$

где  $t$  – температура;  $x, y, z$  – пространственные координаты;  $\tau$  – время.

Температурное поле, описываемое приведенным уравнением, называется **нестационарным**. В этом случае температуры зависят от времени. В том случае, когда распределение температуры в теле не изменяется со временем, температурное поле называется **стационарным**:

$$t = f(x, y, z).$$

Если температура изменяется только по одной или двум пространственным координатам, то температурное поле называется **одно- или двумерным**.

Поверхность, во всех точках которой температура одинакова, называется **изотермической**. Изотермические поверхности могут быть замкнутыми, но не могут пересекаться. Быстрее всего температура

изменяется при движении в направлении, перпендикулярном изотермической поверхности. Скорость изменения температуры по нормали к изотермической поверхности характеризуется градиентом температуры.

**Градиент температуры** ( $\text{grad } t$ ) есть вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности и численно равный производной температуры по этому направлению:

$$\text{grad } t = n_0 \frac{\partial t}{\partial n},$$

где  $n_0$  – единичный вектор, направленный в сторону возрастания температур нормально к изотермической поверхности.

Теория теплопроводности рассматривает тело как непрерывную среду. Согласно основному закону теплопроводности, закону Фурье: вектор плотности теплового потока, передаваемого теплопроводностью, пропорционален вектору градиента температуры:

$$q = -\lambda \text{grad } t = -\lambda n_0 \frac{\partial t}{\partial n},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м · К. Он характеризует способность вещества, из которого состоит рассматриваемое тело, проводить теплоту.

Знак « $\rightarrow$ » указывает на противоположное направление вектора теплового потока и вектора градиента температуры. Вектор плотности теплового потока  $q$  всегда направлен в сторону наибольшего уменьшения температуры.

Рассмотрим двухслойную плоскую стенку с толщиной слоев  $\delta_1$  и  $\delta_2$  с соответствующими коэффициентами теплопроводности  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  (рис. 35). Здесь слои плотно прилегают друг к другу.

В этом случае плотность теплового потока определяется по формуле

$$q = \frac{t_1 - t_3}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} = \frac{\Delta t}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}},$$

где  $n$  – число слоев многослойной стенки;  $t_1$  и  $t_3$  – температуры на внешних границах многослойной стенки.

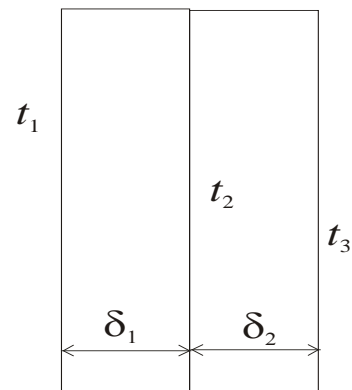


Рис. 35

Плотность теплового потока, проходящего через все слои, в стационарном режиме одинакова. А так как коэффициент теплопроводности  $\lambda$  различен, то для плоской многослойной стенки распределение температур – ломаная линия.

Рассчитав тепловой поток через многослойную стенку, можно найти температуру на границе слоев:

$$t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1}.$$

### Постановка задачи

Толщина бетона 0,25 м, толщина изоляции (пенопласт) 0,15 м. Теплопроводность бетона 1,32 Вт/м · °С, пенопласта 0,04 Вт/м · °С. Плотность бетона 2500 кг/м<sup>3</sup>, пенопласта 30 кг/м<sup>3</sup>. Удельная теплоемкость бетона 2,5 кДж/кг · °С, пенопласта 1,26 кДж/кг · °С. Температура на поверхности стенки с наружной стороны (на пенопласте)  $t = 5 - N$  °С, температура на поверхности стенки с внутренней стороны (на бетоне) 20°С.

### Моделирование

В этом примере рассматривается задача моделирования переноса тепла в твердом теле за счет теплопроводности. Геометрия Conduct.stl.

1. Выберите **Модель – Твердый материал**, уравнение переноса энергии.

2. Задайте **Физические параметры**: Начальные значения, Температура = 20°С; Вещество0: Плотность, Теплопроводность, Удельная теплоемкость.

В данном примере свойства вещества задаются в виде зависимости от  $x$ . Для того чтобы задать свойство вещества в виде формулы:

– на закладке соответствующего свойства нажмите кнопку ;

– выберите из выпадающего списка  (рис. 36);

– в появившемся диалоговом окне **Формула скалярной переменной** введите формулу.

Например, для плотности IF ( $x < 0,25; 2500; 30$ ).

3. Задайте границы объекта.

Граница 1: тип – Симметрия; **Температура**, Тип граничного условия – Симметрия.

Граница 2: тип – Стенка; **Температура**, Тип граничного условия – Диффузионный поток; Значение на стенке =  $t$ , Коэффициент = 100.

Граница 3: тип – Стенка; Температура, Тип граничного условия – Значение на стенке, Значение на стенке = 20.

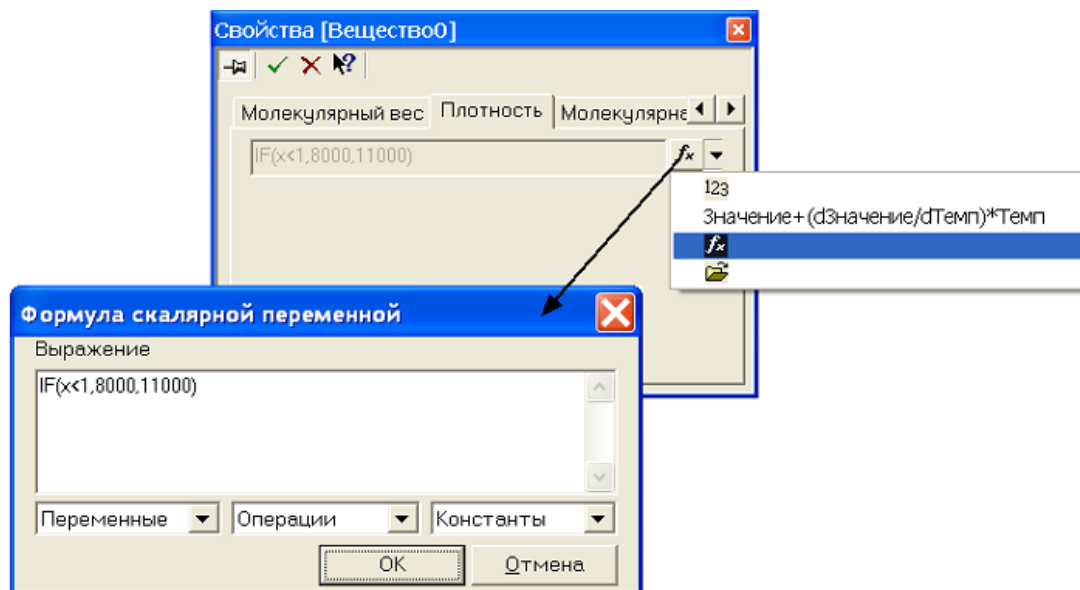


Рис. 36

На закладке **Шаги** поставьте метку в поле Неявная схема, поставьте метку в поле **Фикс.шаг**, введите **Фикс.шаг** = 10 000 с.

13. Выполните предварительный и окончательный расчет задачи.

### Представление и анализ результатов

1. Создайте Заливку для Температуры.
2. Создайте двумерный график для Теплопроводности.
3. Определите среднюю температуру  $t_2$  на границе бетона и пенопласта и сравните ее с рассчитанной по формуле.

# Лабораторная работа № 9

## ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ ВОЗДУХА В ПРОСЛОЙКЕ МЕЖДУ СТЕКЛАМИ ОКНА

### Цель работы:

- 1) моделирование конвективного потока невязкой жидкости в параллелепипеде;
- 2) нахождение профиля скорости и границ применимости теоретического расчета уравнения распределения скорости по высоте пластины.

### Теоретическая часть

Металлопластиковые окна в настоящее время приобрели значительную популярность по следующим причинам: долговечность, высокая герметичность, энергоэффективность. Высокая теплозащита современных стеклопакетов обеспечивается устройством замкнутых воздушных прослоек, благодаря чему эффективно используется теплоизолирующая способность воздуха. Оценить теплотери  $q$ , Вт, через один квадратный метр окна можно по следующей формуле:

$$q = \frac{t_{\text{нар}} - t_{\text{вн}}}{R},$$

где  $t_{\text{нар}}$  – температура воздуха на улице, °С;  $t_{\text{вн}}$  – температура воздуха в помещении, °С;  $R$  – приведенное сопротивление теплопередаче,  $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ .

Известно, что конвективный перенос тепла через воздушную прослойку снижает теплоизолирующую способность воздуха. Конвективный перенос зависит от толщины замкнутой воздушной прослойки  $\delta$ , кинематической вязкости воздуха  $\nu$ , разности температур поверхностей стекол  $\Delta t$ , ограничивающих воздушную прослойку, высоты прослойки  $H$ . В расчетах, как правило, учитывается совместное влияние теплопроводности и конвекции.

Среднюю скорость циркуляции потока воздуха в прослойке можно определить через баланс давлений – перепад давления  $\Delta p_{\text{ц}}$ , обусловленный разностью плотностей воздуха, равен потери давления  $\Delta p_{\text{пот}}$  на трения и завихрения.

Перепад давления равен

$$\Delta p_{\text{ц}} = gH(\rho_1 - \rho_2),$$



где  $\rho_1, \rho_2$  – плотность воздуха при температуре  $t_{нар}$  и  $t_{вн}$  соответственно,  $\rho = 348\,390 / (t + 273)$ , кг/м<sup>3</sup>.

Потери давления

$$\Delta p_{пот} = \frac{32 H (v_1 \rho_1 + v_2 \rho_2) v}{\delta^2} + \zeta \frac{(\rho_1 + \rho_2) v^2}{2},$$

где  $v_1, v_2$  – коэффициенты кинематической вязкости воздуха при температуре  $t_{нар}$  и  $t_{вн}$  соответственно,  $v = (13,28 + 0,09t) \cdot 10^{-6}$ , м<sup>2</sup>/с;  $\zeta = 2,5$  – коэффициент местного сопротивления при развороте потока на 180°.

Тогда средняя скорость потока

$$v = \sqrt{\left( \frac{32 H (v_1 \rho_1 + v_2 \rho_2)}{\zeta \delta^2 (\rho_1 + \rho_2)} \right)^2 + \frac{2 H g (\rho_1 - \rho_2)}{\zeta (\rho_1 + \rho_2)} - \frac{32 H (v_1 \rho_1 + v_2 \rho_2)}{\zeta \delta^2 (\rho_1 + \rho_2)}}.$$

Режим течения в прослойке зависит от критерия Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \beta (t_{нар} - t_{вн}) \delta^3}{\nu^2},$$

где  $\beta = 2 / (t_{нар} + t_{вн} + 546)$  – коэффициент термического расширения среды.

Характер изменения термического сопротивления воздушных прослоек в зависимости от их толщины по различным данным представлен в таблице.

#### Зависимость характеристик стеклопакета от расстояния между стеклами

Толщина $\delta$ , мм	6	12	16	20	30	35	40	50
Показатель $R_0$	0,3	0,35	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36

Как видно из таблицы, термическое сопротивление прослойки постепенно увеличивается до толщины 30 мм, а затем сопротивление воздушной прослойки практически не зависит от толщины.

Согласно формуле М. А. Михеева, среднее термическое сопротивление воздушной прослойки при  $H / \delta > 5$  можно определить как

$$R = \frac{\delta}{0,165 Gr^{0,25} \lambda},$$

где  $\lambda$  – теплопроводность воздуха, Вт/м · °С.

### Условие задачи

В этом примере рассматривается задача моделирования течения в параллелепипеде, в котором узкие вертикальные стороны поддерживаются при разных температурах (одна холодная, другая горячая), а остальные стороны теплоизолированы (рис. 37). Под воздействием выталкивающей силы, обусловленной разностью температур, возникает двумерное конвективное движение.

Высота параллелепипеда 0,09 м, толщина зазора 5, 10, 15, 20, 30 мм. Холодная стенка  $t_1 = -24 + N$  °С, горячая  $t_2 = 20$  °С.

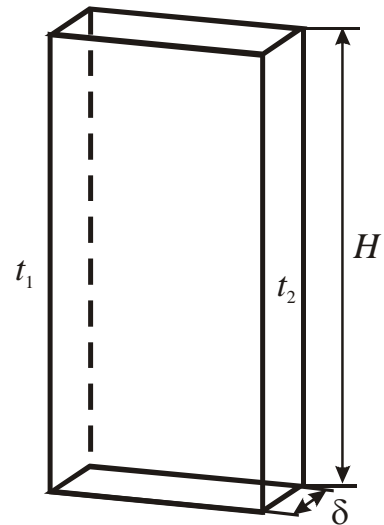


Рис. 37

### Моделирование

1. Загрузите **FlowVision**.
2. Выберите файл D:\Samples\Geom\NaturConvect.wrl.
3. Выберите **Модель – Ламинарная жидкость**, отметьте уравнение Навье – Стокса, уравнение переноса энергии.
4. Задайте **Начальные значения: Температура** =  $t_1$ .
5. Параметры модели: Гидростатика, Плотность = 1,22 кг/м<sup>3</sup>, Уровень жидкости = 1,8 м.
6. Задайте свойства среды: **Вещество0** для воздуха.
7. Задайте **Общие параметры, шаги**: неявная схема, **Фикс. шаг** = 0,2 с; Гравитация, Вектор гравитации  $Y = -9,8$  м/с<sup>2</sup>; Дополнительно: gravity time step = Да.
8. Задайте **Граничные условия**.
9. Задайте начальную расчетную сетку. Введите количество сеточных интервалов 12, 25, 4 для каждой из осей (X, Y, Z).
10. Выполните предварительный и окончательный расчет задачи.

### Представление и анализ результатов

1. Создайте на плоскости Изолинии для Температуры.
2. Создайте в объеме Вспышки для Скорости.
3. Определите максимальную и среднюю скорость движения воздуха.
4. Постройте теоретическую и расчетную зависимость средней скорости воздуха от зазора между стеклами 5, 10, 15, 20, 30 мм.

# Лабораторная работа № 10

## КОЖУХОТРУБНЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК

### Цель работы:

- 1) моделирование теплообменных процессов от одной жидкой среды к другой при параллельноструйном течении;
- 2) нахождение температуры теплоносителей на выходе из прямого и противоточного теплообменников.

### Теоретическая часть

Типичными представителями жидкостно-жидкостных теплообменников являются кожухотрубные аппараты. Основу кожухотрубных теплообменников составляют круглые трубы, заключенные в цилиндрический кожух так, что оси труб и кожуха параллельны. Кожухотрубные теплообменники изготавливают одно- и многоходовыми; прямоточными, противоточными и перекрестноточными.

На рис. 38 приведена конструкция вертикального одноходового (по обоим теплоносителям) противоточного теплообменника, который состоит из цилиндрических труб 1, цилиндрического кожуха 2, опор 3, входного и выходного патрубков 4 одного из теплоносителей, трубных решеток 5, жидкостных крышек 6 с фланцами, верхней 7 и нижней 9 распределительных камер, входного и выходного патрубков 8 другого теплоносителя. Концы труб неподвижно соединены с трубными решетками, которые приварены к кожуху. Патрубки 4 приварены к кожуху, а патрубки 8 – к жидкостным крышкам. Трубы, закрепленные в трубных решетках, образуют трубный пучок.

Принцип действия теплообменника заключается в следующем. Горячая вода через верхний патрубок 8 поступает в распределительную камеру 7 и далее внутрь труб 1, выходит из них в распределительную камеру 9 и из нее – в нижний патрубок 8, затем направляется к источнику нагрева. Нагреваемая вода вводится через правый патрубок 4 в межтрубное пространство теплообменника и движется противотоком к выходному левому патрубку 4, обтекая продольно снаружи трубы 1, затем поступает к потребителю.

В одноходовых теплообменниках по трубному пространству входной и выходной патрубки располагаются в разных жидкостных крышках. Особенностью кожухотрубного теплообменника является меньшее в 2–3 раза проходное сечение труб по сравнению с проходным сечением межтрубного пространства.

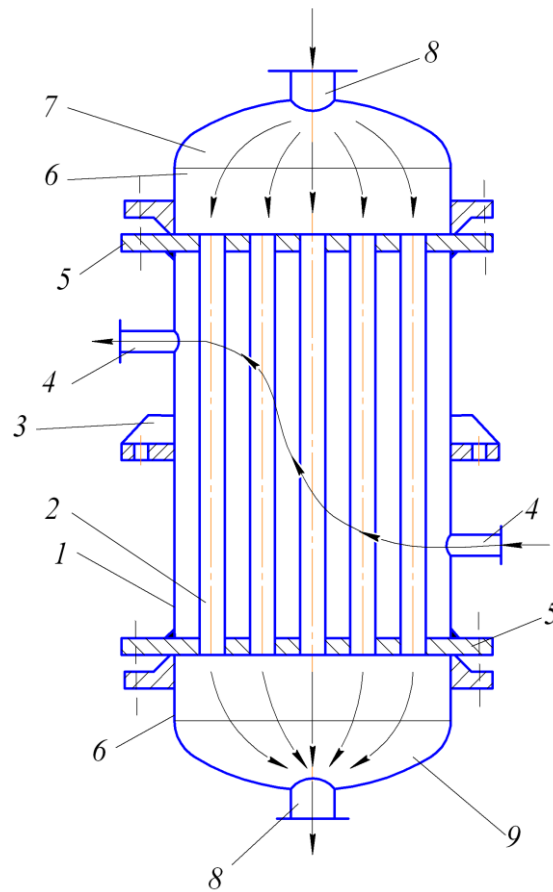


Рис. 38

Площадь поверхности теплообмена теплообменника определяется из уравнения теплопередачи

$$Q = k F \Delta t_{\text{cp}},$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup> · К;  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{\text{cp}}$  – средний температурный напор между теплоносителями, °С.

Средний температурный напор при прямоточном и противоточном движении теплоносителей рассчитывают как среднелогарифмический

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \left( \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} \right)},$$

где  $\Delta t_{\text{б}}$ ,  $\Delta t_{\text{м}}$  – соответственно большая и меньшая из разностей температур теплоносителей на входе и выходе теплообменника.

Если  $\Delta t_{\bar{6}} / \Delta t_{\bar{m}} \leq 1,7$ , то с точностью до 2% средний температурный напор вычисляется по формуле

$$\Delta t_{\text{cp}} = 0,5(\Delta t_{\bar{6}} + \Delta t_{\bar{m}}).$$

Для прямотока всегда  $\Delta t_{\bar{6}} = t'_1 - t'_2$ , а  $\Delta t_{\bar{m}} = t''_1 - t''_2$ . Для противотока  $\Delta t_{\bar{6}} = t''_1 - t'_2$ ,  $\Delta t_{\bar{m}} = t'_1 - t''_2$  или наоборот  $\Delta t_{\bar{6}} = t'_1 - t''_2$ ,  $\Delta t_{\bar{m}} = t''_1 - t'_2$ .

При прямотоке конечная температура  $t''_2$  нагреваемого теплоносителя не может быть больше конечной температуры  $t''_1$  греющего теплоносителя, т. е. всегда  $t''_2 < t''_1$ . Противоток свободен от этого ограничения и здесь, как правило,  $t''_2 > t''_1$ . В этом состоит одно из преимуществ противоточной схемы движения. Как правило, при противотоке средний температурный напор больше по сравнению с прямотоком, т. е.  $\Delta t_{\text{cp}}^{\text{прот}} > \Delta t_{\text{cp}}^{\text{прям}}$ , что позволяет иметь меньшую площадь поверхности теплообмена аппарата.

### Постановка задачи

Течение холодной воды  $t_1 = 4 + 0,5N$  °С сквозь пакет трубок, по которым движется горячая вода  $t_2 = 80 + N$  °С. Отношение проходного сечения трубок горячей среды к полному сечению теплообменника 0,7. Скорость горячей и холодной среды  $v = 0,7$  м/с.

### Моделирование

1. Загрузите **FlowVision**.
2. Выберите файл D:\Samples\Geom\Porous.wrl.
3. Выберите **Модель – Пористая среда**, отметьте уравнение Навье – Стокса, уравнение переноса энергии, уравнения переноса турбулентных функций, уравнение теплопроводности для каркаса.
4. Задайте **Начальные значения**: температура =  $t_1$ , пульсации – 0,03, масштаб турбулентности – 0,01; температура каркаса =  $t_2$ .
5. Параметры модели: пористость, Пористость = 0,7; каркас, Плотность = 1000 кг/м<sup>3</sup>, Коэф. теплоотдачи = 27 600 Вт/м<sup>2</sup> · К, Коэф. теплоемкости = 4170 Дж/кг · К; теплопроводн. каркаса: L\_11 = 0,0068 Вт/м · К, L\_22 = 0,68 Вт/м · К, L\_33 = 0,0068 Вт/м · К; скорость теплоносителя: уСкорость =  $\pm v$  м/с.
6. Задайте свойства среды: **Вещество0** для воды.
7. Перегруппируйте геометрию: Угол перегруппировки = 50°.
8. Задайте **Общие параметры, шаги**: неявная схема, КФЛ = 500.
9. Задайте **Граничные условия**.

Граница 0: тип – Стенка; **Температура**, Тип граничного условия – Нулевой поток; **Скорость**, Тип граничного условия – Стенка, логарифмический закон, Шероховатость = 0; **Температура каркаса**, Тип граничного условия – Нулевой поток.

Граница 1: тип – Стенка; **Температура**, Тип граничного условия – Нулевой поток; **Скорость**, Тип граничного условия – Стенка, логарифмический закон, Шероховатость = 0; **Температура каркаса**, Тип граничного условия – Значение на стенке =  $t_2$ .

Граница 2: тип – Вход/Выход; **Температура**, Тип граничного условия – Значение на стенке, Значение на стенке =  $t_1$ ; **Скорость**, Тип граничного условия – Нормальная массовая скорость =  $\rho \cdot v$ ; **Турб-Энергия**, Тип граничного условия – Пульсация, Пульсация = 0,03; **ТурбДиссипация**, Тип граничного условия – Масштаб турбулентности, Масштаб = 0,01.

Граница 3: тип Свободный выход; **Температура**, Тип граничного условия – Нулевой поток; **Скорость**, Тип граничного условия – Нулевое давление/Выход.

10. Откройте папку **Геометрия**, задайте граничные условия.

11. Задание начальной расчетной сетки. Введите количество сеточных интервалов 18, 38, 18 для каждой из осей (X, Y, Z).

12. Задание фильтра сопротивления: нажмите правой кнопкой мыши на папке **Фильтры** и выберите в контекстном меню **Создать**; выберите **Объект = Все пространство**; выберите **Тип – Анизотропное сопротивление с источником тепла**; задайте следующие параметры сопротивления на закладке D&E:  $E_{11} = 0,16$ ,  $E_{22} = 0,02$ ,  $E_{33} = 0,16$ .

13. Выполните предварительный и окончательный расчет задачи.

### **Представление и анализ результатов**

1. Создайте Заливку по Температуре и Заливку по Температуре Каркаса.

2. Определите температуру на выходе горячего и холодного теплоносителя для прямоточной и противоточной схем движения теплоносителей. Рассчитайте коэффициент теплопередачи для прямоточной и противоточной схемы движения теплоносителей.

# Лабораторная работа № 11

## КОНДЕНСАТОР

### Цель работы:

- 1) моделирование процесса конденсации газообразной среды в замкнутом объеме;
- 2) нахождение температуры и скорости конденсации.

### Теоретическая часть

**Конденсатор** – теплообменный аппарат для конденсации (превращения в жидкость) паров вещества путем охлаждения. По принципу теплообмена конденсаторы разделяются на смешивающие и поверхностные. В *смешивающих* конденсаторах пар непосредственно соприкасается с охлаждающей водой, а в *поверхностных* он отдает тепло через стенки трубок, внутри которых протекает охлаждающая вода.

Для охлаждения пара используется более холодная среда, очень часто – обычная вода. Охлаждающая вода разбрызгивается в пространстве смешивающего конденсатора. Пар конденсируется на поверхности капель воды и стекает вместе с ней в поддоны, откуда откачивается конденсатными насосами. Взаимное расположение потоков пара и воды может быть параллельным, противоточным или поперечноточным. При противотоке теплообмен более эффективен.

Для конденсации пара какого-либо вещества необходимо отвести от каждой единицы его массы теплоту, равную удельной теплоте конденсации. Для обратимых процессов она равна удельной теплоте парообразования:

$$Q = G_1 r = G_2 c_2 (t_2'' - t_2'),$$

где  $Q$  – тепловой поток, кВт;  $G_1$ ,  $G_2$  – массовые расходы пара и охлаждающей воды, кг/с;  $r$  – теплота парообразования, кДж/кг;  $c_2$  – удельная средняя массовая изобарная теплоемкость охлаждающей воды,  $c_2 = 4,186$  кДж/кг · С;  $t_2'$ ,  $t_2''$  – температура охлаждающей воды на входе и выходе из аппарата, °С.

Поскольку при конденсации, как и при испарении, температура не изменится, пока не сконденсируется весь пар, процесс происходит практически при постоянных параметрах пара. Параметры пара при конденсации близки к состоянию насыщения. В то же время при по-

ступлении все новых порций пара в конденсаторе устанавливается динамическое равновесие, и в разных частях конденсатора параметры среды могут несколько отличаться друг от друга.

### Постановка задачи

Рассматривается двумерное двухфазное течение. Несущая фаза: воздух и водяной пар. Дисперсная фаза: капли воды с температурой  $t_k = 5 + N$  °С. Холодные капли подаются снизу. Горячая паровоздушная смесь с температурой 100°С подается сверху. Расход холодной воды  $G_k = 2, 3, 4, 5, 6$  кг/с; воздушно-паровой смеси  $G_n = 1$  кг/м<sup>2</sup>·с.

### Моделирование

1. Геометрия – Particles\_Condens.wrl (рис. 39).

2. В окне Выбор Модели: **Модель** – Слабосжимаемая жидкость; уравнения – Энергия, Концентрация, Скорость и Частицы.

Это означает, что будут решаться уравнение энергии, уравнение сохранения массы для водяного пара, уравнение Навье – Стокса.

3. В папке Физические параметры: Начальные значения; **Температура** = 100°С, **Концентрация** = 0,9.

Параметры модели: Массоперенос, **Модель** – Массовая концентрация; **Вещество0** – Воздух; **Вещество1** – Водяной пар; **ВеществоЧастиц** – Вода.

Частицы, Траектории, Выпускать каждые  $N$  шагов = 0; Релакс. Параметр = 0,1; Нестационарность = 0;  $N$  траекторий = 200; Шаг по пространству = 0,025; Конденсация = 1; Абляция = 1.

4. Задайте **Граничные условия**.

Граница 1: тип – Симметрия; **Температура**, Тип граничного условия – Симметрия; **Концентрация**, Тип граничного условия – Симметрия; **Скорость**, Тип граничного условия – Стенка с проскальзыванием; **СкоростьЧастиц**, Тип граничного условия – Симметрия.

Граница 2: тип – Вход/Выход; **Температура**, Тип граничного условия – Значение на стенке, Значение на стенке = 100; **Концентра-**

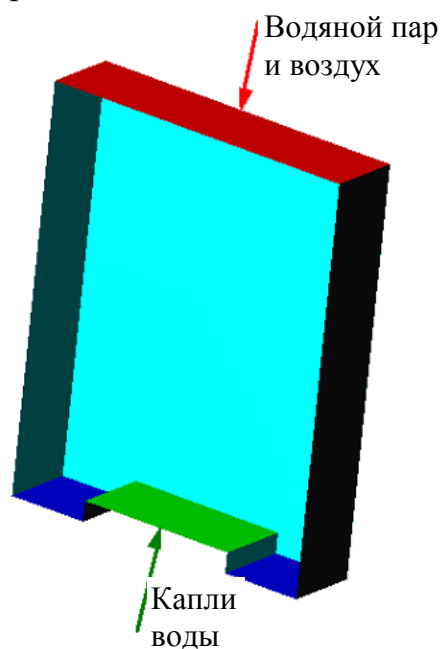


Рис. 39



**ция**, Тип граничного условия – Значение на стенке, Значение на стенке = 0,9; **Скорость**, Тип граничного условия – Норм. массовая скорость  $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с} = 1$ ; **Скорость Частиц**, Тип граничного условия – Частицы – выход.

Граница 3: тип – Свободный выход; **Температура**, Тип граничного условия – Нулевой поток; **Концентрация**, Тип граничного условия – Нулевой поток; **Скорость**, Тип граничного условия – Нулевое давление/выход; **Скорость Частиц**, Тип граничного условия – Частицы – выход.

Граница 4: тип – Стенка; **Температура**, Тип граничного условия – Нулевой поток; **Концентрация**, Тип граничного условия – Нулевой поток; **Скорость**, Тип граничного условия – Стенка с проскальзыванием; **Скорость Частиц**, Тип граничного условия – Частицы + + скорость; Поток частиц,  $\text{кг/с} = 2, 3, 4, 5, 6$ ; Температура частиц =  $t_k$ ; Диаметр частиц = 0,001; Массовая доля = 0,1; Чернота частиц = 0;  $N$  стартовых точек = 200;  $N$  мод. частиц /  $\text{м}^3 = 1000$ ; Скорость частиц = 10; Угол распыла = 5.

5. Задайте начальную расчетную сетку  $40 \times 1 \times 40$ .

6. На закладке **Гравитация**: Вектор гравитации  $Z \text{ м/с}^2 = 9,81$ . На закладке **Шаги**: поставьте метку в поле КФЛ, задайте КФЛ = 5, задайте Макс. шаг = 0,1 с.

7. Выполните предварительный и окончательный расчет задачи.

### Представление и анализ результатов

1. Создайте заливки для переменных Температура, Температура Частиц и Концентрация Частиц; вектора для переменных Скорость и Скорость Частиц.

2. Определите температуру и расход смеси на выходе из конденсатора.

3. Постройте зависимость температуры и расхода смеси в зависимости от расхода холодной воды (2, 3, 4, 5, 6  $\text{кг/с}$ ).

4. Рассчитайте действительно необходимый расход холодной воды для полной конденсации пара.

# ПРОГРАММА РАСЧЕТА СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ТЕПЛОБМЕННЫХ АППАРАТОВ

## I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1. Структура программы

Специалистами кафедры энергосбережения, гидравлики и тепло-техники УО «Белорусский государственный технологический университет» создана программа для выбора аппаратов воздушного охлаждения (АВО) из имеющегося номенклатурного ряда выпускаемых аппаратов и оптимизации конструкции АВО на основе теплового и гидравлического расчета (рис. 40).

The screenshot displays the 'Apparatus of Air Cooling' software interface. The main window title is 'Аппарат воздушного охлаждения'. The interface is divided into several sections:

- Top Bar:** Includes menu items: Выход, Данные, Аппарат, Расчет, Размерность, О программе.
- Header:** 'АВГБ' (Air Cooling Apparatus) is highlighted in yellow.
- Input Fields:**
  - Охлаждаемая среда: дизельное топливо
  - Q = 536.68 кВт, P = 160 кПа,  $\Delta P_{max}$  = 4000 кПа
  - АВГБ - 20.57 - 1.6 - Б1
  - точно 4- 4- 8
  - Аппарат АВГБ, Данные расчета
  - Вентилятор, Ребра: Тип KLM,  $\varphi$  = 20
- Technical Characteristics Table:**

$G, т/ч$	$t_{вх}, ^\circ C$	$t_{вых}, ^\circ C$	$v, м/с$	$R, м^2 К/Вт$	$\Delta P, кПа$	$N, кВт$
13.6	110	45	0.72	0.0	14.3	0.08
124.9	28	35.7	12.27	0.0	0.272	13.35
- Apparatus Parameters (left):**
  - Количество секций: 1
  - Угол атаки поток: 90
  - Длина трубы: 8 м
  - Фронтальное сечение: 9.40 м<sup>2</sup>
  - Козф. загромождения: 0.520
  - Эквивалентный диаметр пучка: 5.02 мм
  - Определяющий размер: 43.38 мм
  - Площадь поверхности теплообмена:
    - оребреной трубы: 1.654 м<sup>2</sup>
    - ребер: 1.59 м<sup>2</sup>
- Blower Parameters (center):**
  - Вентилятор: 4АВО 25-К
  - Диаметр: 2500 мм
  - Количество: 2
  - $n$  = 500 об/мин
  - $\alpha$  = 10
  - Мощность двигателя: 13.0 кВт
- AVO Parameters (right):**
  - Параметры АВО
  - Параметры пучка:
    - Общее число труб: 76
    - Число труб в одном ходу секции: 19, 19, 19, 19
    - Длина секции, А: 7.454 м
    - Ширина секции, В: 1261 мм
    - Фронтальное сечение: 9.40 м<sup>2</sup>
    - Шаг труб: S1 = 63.5 мм, S2 = 63.5 мм
    - Расстояние от секции до пучка, t: 27.3 мм
- Footer:** Подсказка: Выбор охлаждаемой среды. Logo: ОктябрьскХимМаш (Закрытое Акционерное Общество).

Рис. 40

Модель программы включает следующие модули и функции.

*Базовый модуль* – ввод и расчет энергетических и физических характеристик охлаждаемой среды и воздуха (рис. 41).

Охлаждаемая среда: **дизельное топливо**

Q= **6061.35** кВт R= **160** кПа  $\Delta P_{max}$  = **4000** кПа

Теплотехнические и гидравлические характеристики

G, т/ч	t <sub>вх</sub> , °C	t <sub>вых</sub> , °C	v, м/с	R, м <sup>2</sup> К/Вт	$\Delta P$ , кПа	N, кВт
153,6	110	45	2,70	0,0	295,9	19,75
252,1	28	37,6	24,85	0,0	1,145	113,21

Рис. 41

*Конструктивный модуль* – ввод и расчет геометрических параметров АВО (рис. 42, а) и пучка (рис. 42, б).

*Расчетный модуль* – расчет тепловых и гидравлических параметров АВО.

*Оптимизационный модуль* – оптимизация конструкции аппарата для обеспечения необходимого запаса теплообменной поверхности.

**а**

3 АВГБ - 20.57 - 1.6 - Б1

точно 5- 5- 12

Аппарат АВГБ ▾ Данные расчета ▾

Число рядов ▾ 3

Число ходов ▾ 4

Длина труб, м ▾ 5

▾ 6

Параметры а

Колличество секций  авто

Угол атаки потоком 90

Длина трубы 12 м

Фронтальное сечение 14.10 м<sup>2</sup>

Коеф. загромождения 0.520

Эквивалентный диаметр пучка 5.02 мм

Определяющий размер 43.38 мм

Площадь поверхности теплообмена

орезренной трубы 1.654 м<sup>2</sup>

ребер 1.59 м<sup>2</sup>

**б**

Оребрение

Диаметр оребрения

наружный 56.0 мм

внутренний 25.6 мм

Высота ребра 15.2 мм

Толщина ребра 0.40 мм

Шаг ребра 2.50 мм

Действит. коеф. оребрения 20.57

Материал трубы Ст. 10

Число труб в одном ряду секции 19 19 19 19 19

Принять

Диаметр трубы

внутренний 21 мм

наружный 25 мм

Теплопроводность ребра трубы 210 57,0

авто

Рис. 42

Стандартные методики [2, 4, 8] теплового и гидравлического расчета АВО основаны на применении большого количество данных, представленных в виде таблиц, графиков и диаграмм, что неудобно

для практического применения. Поэтому в программе имеются следующие виды библиотек:

- таблица конструкторско возможных геометрических параметров АВО (количество секций, рядов и ходов труб, площадь проходного сечения (для зигзагообразных – угол атаки воздушного потока));

- таблица технологически возможных компоновочных параметров пучка (продольный и поперечный шаг в пучке, коэффициент оребрения, диаметры несущей трубы и оребрения);

- теплофизические свойства воздуха и охлаждаемых сред (зависимость коэффициентов теплоемкости, вязкости, теплопроводности, плотности от температуры (для газообразных сред и от давления));

- характеристики вентиляторов (зависимость создаваемого напора и к. п. д. от расхода для различных углов установки лопастей и частоты вращения);

- система критериальных уравнений с библиотекой характерных коэффициентов и зависимостей для расчета теплопередающих параметров (коэффициентов теплоотдачи, термического контактного сопротивления).

В техническом задании на подбор АВО пользователь должен выбрать его тип: малопоточный, зигзагообразный, горизонтальный с учетом особенностей охлаждающей среды. Кроме того, выбирается способ присоединения секций (последовательный или параллельный), а также в зависимости от характеристик охлаждаемой среды (вязкость, токсичность, пожароопасность, взрывоопасность, коррозионная агрессивность и др.) и условий охлаждения (температура и влажность воздуха) выбирается способ исполнения АВО.

Программа проста в работе: пользователь задает известные величины в окошки, выделенные белым цветом. К таким параметрам относятся температурный режим охлаждающего воздуха; тепловая нагрузка, тип (состав) и параметры (расход, температура, давление) охлаждаемой рабочей среды; термическое сопротивление загрязнений; допустимые гидравлические потери, минимальный запас площади поверхности теплообмена.

Пользователь может сам выбирать единицы измерения различных величин в соответствии со своими задачами. Так, расход среды можно задавать в т/ч или кг/с, тепловую мощность – кВт или Гкал/ч, давление – Па или атм. При изменении единиц измерения ранее введенные величины корректно пересчитываются: программа хранит значения во внутренних единицах, не зависящих от выбора пользователя.

Программа может осуществлять расчет АВО для охлаждения потоков сред, имеющихся в библиотеке (дизельное топливо, бензин, природный газ, мазут, трансформаторное масло и др.), а также для других сред с из-

вестными теплофизическими характеристиками. В последнем случае параметры задаются в специальном модуле, в котором пользователь имеет возможность выбрать размерности теплофизических величин (рис. 43, а). При этом допустимы следующие варианты процесса охлаждения потока: однофазная среда (газ или жидкость), двухфазная среда (смесь жидкости и газа), с фазовым переходом (охлаждение газа с конденсацией (полной или частичной), а затем охлаждение жидкости или смеси жидкости и газа.)

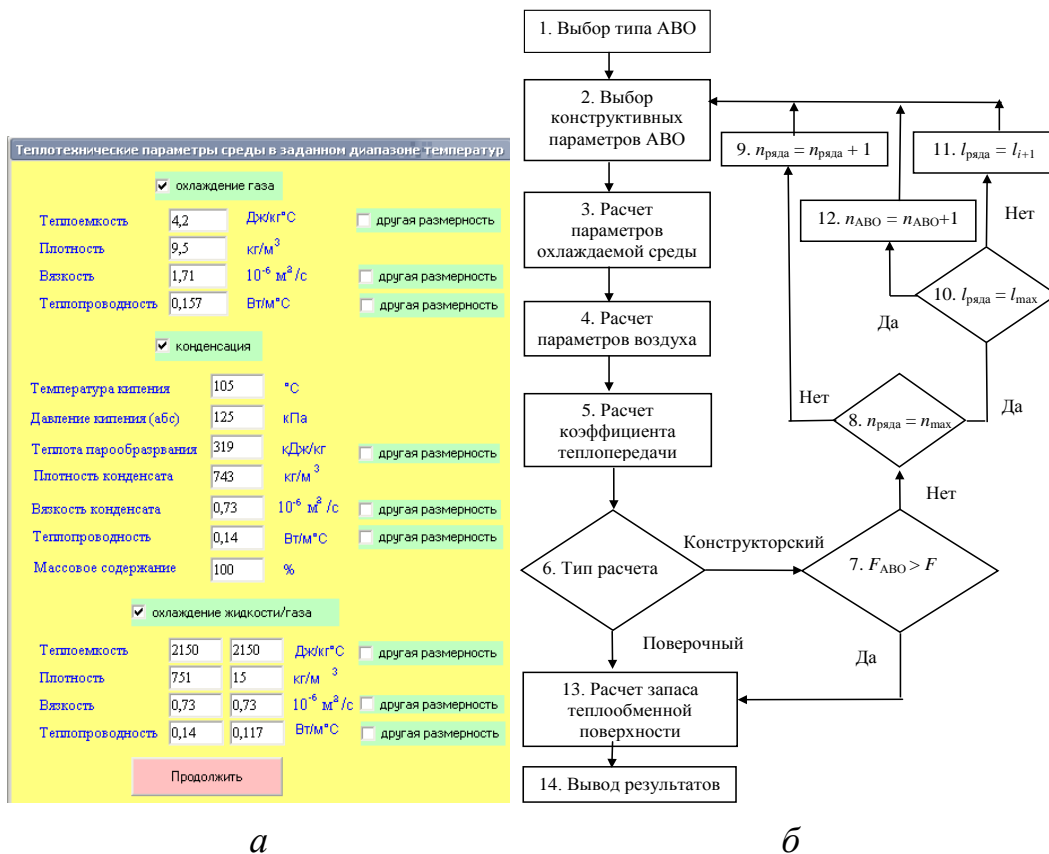


Рис. 43

Программа позволяет оптимизировать компоновочные параметры теплообменного пучка. Для этого имеются функции **Частный расчет** и **Обобщенный расчет**, которые задаются пользователем.

Особенность функции Частный расчет заключается в том, что здесь применяются уравнения подобия для теплоотдачи и сопротивления по воздушной стороне для конкретного типа поверхности теплообмена с ее геометрическими и компоновочными параметрами, которые в большинстве случаев являются собственностью разработчиков программы или заводов-изготовителей АВО, для которых создается программа. Данные уравнения получены на основании целевых

продувок пучков в аэродинамической трубе, и погрешность расчета по ним приведенного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$  и перепада давления воздуха не превышает  $\pm 5\%$ . Диапазоны характеристик оребрения, для которых получены критериальные уравнения, заложены в библиотеку компоновочных параметров пучка. В случае если параметры пучка не соответствуют заданным диапазонам, программа автоматически включает функцию Обобщенный расчет.

Функция Обобщенный расчет позволяет выполнять расчеты теплоаэродинамических характеристик пучка в широком диапазоне геометрических и компоновочных параметров, но на основе уравнений, имеющих погрешность до 20%. Особенностью функции Обобщенный расчет является задание исходных данных взаимовлияющих параметров (шаг и диаметр оребрения, число труб в каждом ряду, шаги разбивки пучка, площадь фронтального сечения и др.) теплообменного аппарата в едином многооконном диалоге (см. рис. 42, б). Определение компоновочных параметров пучка (количество и расположение труб, коэффициент загромождения, коэффициент оребрения) во многом автоматизировано.

Теплообменная поверхность АВО представляет собой шахматный пучок из оребренных биметаллических труб. В АВО применяются исключительно два конструктивных типа круглых теплообменных труб: биметаллические трубы с накатными спиральными алюминиевыми ребрами (рис. 44, а) и биметаллические трубы с навитыми спиральными *KLM*-ребрами (рис. 44, б).

Принятые на рис. 44, а, б, обозначения соответствуют следующим геометрическим параметрам:  $d_1$  – внутренний диаметр несущей трубы;  $d$  – наружный диаметр ребра;  $d_0 = d - 2h$  – диаметр ребра по его основанию;  $d_n$  – наружный диаметр несущей трубы;  $d_k$  – диаметр контактной зоны;  $h$ ,  $s$  – высота и шаг ребра;  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  – толщина ребра у вершины и основания;  $\Delta$  – средняя толщина ребра.

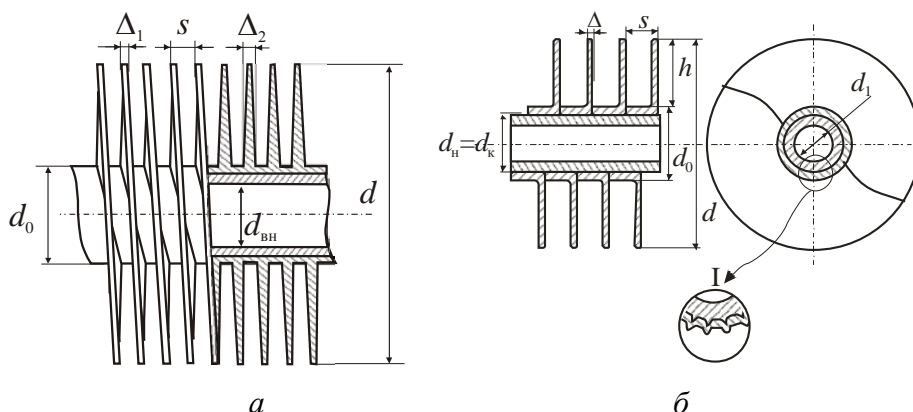


Рис. 44

## 2. Алгоритм оптимизации конструкции АВО

Расчет АВО, выполняемый при помощи программы, может быть двух типов:

– *поверочный* – пользователь проверяет реализацию тепловых нагрузок АВО, выбранного из имеющегося номенклатурного ряда выпускаемых аппаратов;

– *конструкторский* – пользователь проектирует конструкцию АВО под определенные тепловые режимы.

При проведении поверочного расчета АВО пользователь с помощью диалогового окна задает определенную конструкцию аппарата (см. рис. 42, а), а при конструкторском пользователь позволяет программе выбирать длину труб, число рядов и ходов секции (режим авто).

Алгоритм оптимизации конструкции АВО представлен на рис. 43, б. Два этапа (четвертый и пятый) решаются методом схождения через цикл. Четвертый этап заключается в решении системы уравнений аэродинамических характеристик воздушного тракта АВО и вентилятора:

$$\begin{cases} H_{\text{в.АВО}} = f(V_{\text{в.АВО}}), \\ H_{\text{вент}} = f(V_{\text{вент}}), \end{cases}$$

где  $H$  – напор воздуха;  $V$  – объемный расход воздуха.

Пятый этап заключается в определении термического сопротивления контакта оребрения с основной трубой  $R_k$  через неявную связь с коэффициентом теплопередачи  $k$ :

$$k = \frac{1}{\frac{\varphi d_0}{d_1} \left( \frac{1}{\alpha_1(t_1)} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + R_k(t_k) + \frac{d_1}{d_k} \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2(t_2)}},$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от охлаждаемой среды к несущей трубе;  $\delta_1, \lambda_1$  – толщина и коэффициент теплопроводности материала несущей трубы;  $\delta_2, \lambda_2$  – толщина и коэффициент теплопроводности материала оребрения;  $\alpha_2$  – приведенный коэффициент теплоотдачи от воздуха к оребрению;  $t_1, t_2, t_k$  – средняя температура охлаждаемой среды, воздуха и контакта основной трубы и оребрения соответственно. Для конструкторского расчета оптимизация конструкции АВО выполняется сначала на основе теплотехнического расчета (критерием соответствия является теплопередающая поверхность  $F_{\text{АВО}}$  аппа-

рата), а затем на основе гидравлического расчета (критерием соответствия являются допустимые потери давления по тракту охлаждаемой среды).

Если расчетная площадь (для осуществления теплового режима) теплопередающей поверхности  $F$  более площади теплопередающей поверхности  $F_{\text{АВО}}$  выбранного АВО, то программа сначала увеличивает число поперечных рядов секции  $n_{\text{ряда}}$ , а затем длину труб  $l$  пучка (см. рис. 43, б). При отсутствии необходимого результата программа увеличивает количество аппаратов.

Если потери давления по тракту охлаждаемой среды больше допустимого значения, то программа первоначально уменьшает число ходов, а затем увеличивает количество подключенных параллельно аппаратов.

Результатом расчета является подбор АВО из имеющегося номенклатурного ряда выпускаемых аппаратов с учетом накладываемых требований, а также определение всех конструктивных и энергетических параметров.

Еще одной особенностью программы является форма представления результата: пользователь получает полный протокол расчета, включая промежуточные параметры и ссылки на примененные методики. Этим достигаются две цели: пользователь имеет возможность контролировать весь ход расчета и анализировать полученные результаты. Отчеты формируются на основе шаблонов, заполненных пользователем, что позволяет быстро получать результаты расчета в требуемом виде, а также изменять их в Microsoft Excel.

### **3. Подбор аппарата воздушного охлаждения**

Программа создавалась с целью обеспечить максимальное удобство пользования, поэтому на интерфейсе имеется достаточное количество пояснений. Также при выделении курсивом внизу программы в нижнем окне (рис. 45, 32) появляется подсказка о назначении окна или кнопки.

При вызове программы для расчета АВО автоматически предлагается произвести расчет для АВМК (рис. 45). Для расчета АВО другого типа необходимо в командной строке в графе аппарат (рис. 45, в) выбрать необходимый тип АВО, пометив его галочкой. При расчете программа автоматически подбирает число рядов в аппарате, число ходов и длину оребренной трубы. Однако если необходимо точно за-



дать эти параметры, то можно сделать это через активную кнопку Аппарат АВО (рис. 45, 12), выделив необходимый параметр галочкой. Также необходимо выбрать тип исполнения АВО (Б1, или Б2, или ...) и способ присоединения секции (последовательный или параллельный) через активную кнопку Данные расчета → Исполнение АВО и Данные расчета → Способ присоединения секций (рис. 45, 3). Затем выбираем охлаждаемую среду через активную кнопку Охлаждаемая среда (рис. 45, 8). После этого начинаем вводить данные для расчета.

Расчет можно производить по тепловой нагрузке  $Q$  (рис. 45, 1) или по расходу охлаждаемой среды  $G$  (рис. 45, 2). Выбор расчета осуществляется через активную кнопку Данные расчета → Заданный параметр (рис. 45, 3), пометив необходимый параметр галочкой. При этом окошки, в которые необходимо ввести данные, выделяются белым цветом. Нажатие командной строки размерность (рис. 45, д) позволяет переключать единицы измерения нагрузки  $Q$  с Гкал/ч на кВт, единицы измерения расхода  $G$  с т/ч на кг/с и т. д. Далее в графе (рис. 45, 1 или 2) необходимо ввести исходные данные. После чего вводятся входные и выходные температуры по охлаждающей среде (рис. 45, 3, 4) и температура воздуха (рис. 45, 5), задаются давление охлаждаемой среды (рис. 45, 6) и допустимые потери давления в АВО по охлаждаемой среде (рис. 45, 7). При необходимости можно ввести коэффициент термического загрязнения со стороны охлаждаемой среды (рис. 45, 9) и воздуха (рис. 45, 11), а также запас по теплообменной поверхности (рис. 45, 10).

Затем необходимо ввести тип (накатное или *KLM*-ребро) (рис. 45, 13) и коэффициент оребрения (рис. 45, 14). Параметры оребрения можно посмотреть, выбрав в активной кнопке (рис. 46, 15) пункт Параметры оребрения (рис. 46). При необходимости высоту, толщину и шаг ребра (рис. 46, 17, 18, 19) можно изменить. Корректность изменений необходимо проверить, нажав кнопку Принять (рис. 46, 20). При этом также произойдет расчет нового коэффициента оребрения (рис. 46, 21).

При выборе исполнения АВО автоматически выбирается тип стали основной трубы, который затем можно уточнить через активную кнопку Материал трубы (рис. 46, 22); можно также задать теплопроводность материала, из которого изготовлено оребрение, и теплопроводность материала, из которого сделана основная труба (рис. 46, 23 и 24). Для осуществления правильного расчета необходимо проверить, точно ли заданы параметры секции: внутренняя длина  $A$  (рис. 46, 25) и внутренняя ширина  $B$  (рис. 46, 26), а также шаги пучка оребренных труб (рис. 46, 27 и 28).

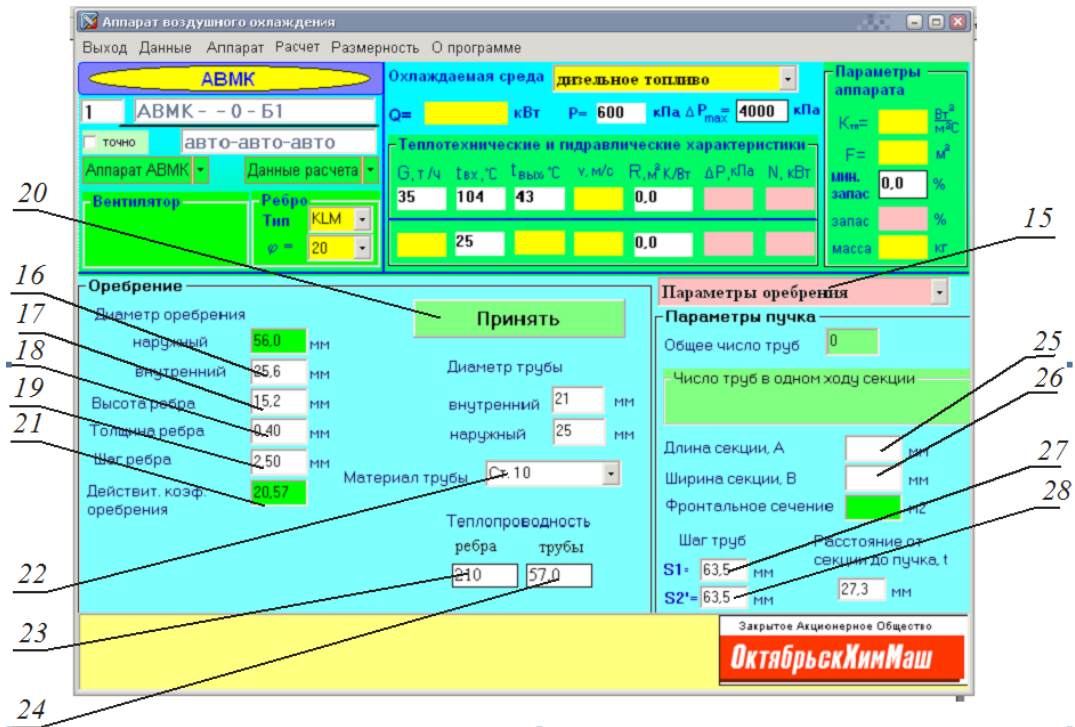


Рис. 45

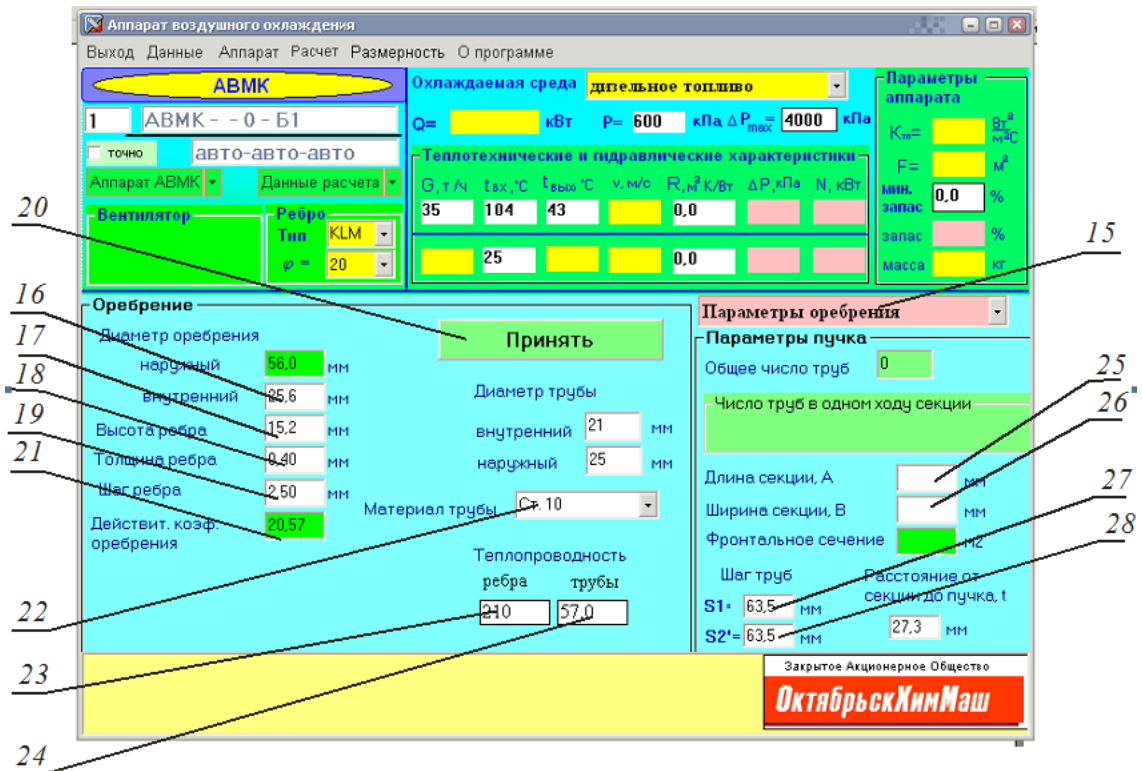


Рис. 46

Расчет производится при нажатии на кнопку Расчет (рис. 45, *з*) в командной строке. Нажатие на указанную кнопку проводится после каждого изменения каких-либо исходных данных. Параметры рассчитанного аппарата будут представлены в окне на рис. 45, *29*, а количество аппаратов – в окне на рис. 45, *30*. При необходимости расчета точного количества аппаратов следует задать это количество в окне на рис. 45, *30*, а в окне Точно (рис. 45, *31*) поставить галочку.

Выполненный расчет можно сохранить в Microsoft Excel или распечатать на принтере, выбрав в командной строке Данные (рис. 45, *б*) требуемую операцию.

## II. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Лабораторная работа № 1

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ АВО

Выполните тепловой и гидравлический расчет для аппарата АВГБ при охлаждении дизельного топлива атмосферным воздухом. Исходные данные:

- расход дизельного топлива  $350 + 25N$  т/ч;
- температура дизельного топлива на входе в аппарат  $104^{\circ}\text{C}$ , на выходе  $43^{\circ}\text{C}$ ;
- рабочее давление керосина  $0,1$  МПа;
- температура охлаждающего воздуха на входе  $26^{\circ}\text{C}$ ;
- тип оребрения *KLM*, коэффициент оребрения  $22$ ;
- длина трубы  $12$  м;
- допустимые потери давления по дизельному топливу  $200$  кПа.

Рассчитайте оптимальное конструктивное исполнение аппарата для различного количества рядов (3, 4, 5, 6). Причем для каждого ряда рассчитайте все возможные варианты количества ходов. Для каждого результата расчета определите количество аппаратов, площадь теплообменной поверхности, запас теплообменной поверхности, теплоэнергетическую функцию  $E$ .

Результаты расчета представьте в виде графических зависимостей:

а) (количество аппаратов · площадь теплообменной поверхности) от числа ходов для каждого варианта числа рядов 3, 4, 5, 6 (четыре кривые на одном графике);

б) (количество аппаратов · площадь теплообменной поверхности / (1 + коэффициент запаса / 100)) от числа ходов для каждого варианта числа рядов 3, 4, 5, 6 (четыре кривые на одном графике);

в) теплоэнергетическая функция  $E$  от числа ходов для каждого варианта числа рядов 3, 4, 5, 6 (четыре кривые на одном графике).

Рассчитайте автоматический режим программой и проверьте, действительно ли программа выбирает лучший вариант.

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ИСПОЛНЕНИЯ ОРЕБРЕНИЯ

Выполните тепловой и гидравлический расчет для аппарата АВГБ при охлаждении дизельного топлива атмосферным воздухом. Исходные данные:

- расход дизельного топлива  $35 + 2N$  т/ч;
- температура дизельного топлива на входе в аппарат  $104^{\circ}\text{C}$ , на выходе  $43^{\circ}\text{C}$ ;
- рабочее давление керосина  $0,1$  МПа;
- температура охлаждающего воздуха на входе  $26^{\circ}\text{C}$ ;
- число рядов – автоматический выбор, число ходов – автоматический выбор, длина трубы – автоматический выбор;
- допустимые потери давления по дизельному топливу  $200$  кПа.

Рассчитайте характеристики аппарата для различных способов исполнения оребренных труб (накатное и *KLM*-ребро) для всех вариантов коэффициента оребрения.

Результаты расчета представьте в виде графических зависимостей:

а) (количество аппаратов · площадь теплообменной поверхности) от коэффициента оребрения для накатного ребра и *KLM*-ребра (две кривые на одном графике);

б) (количество аппаратов · площадь теплообменной поверхности /  $(1 + \text{коэффициент запаса} / 100)$ ) от коэффициента оребрения для накатного ребра и *KLM*-ребра (две кривые на одном графике).

Определите наилучший вариант. Для наилучшего сделайте расчеты для различных вариантов высот ребер (5 точек). Определите оптимальную высоту ребра.

# Лабораторная работа № 3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ

Выполните тепловой и гидравлический расчет для аппарата АВГ для охлаждения дизельного топлива атмосферным воздухом. Исходные данные:

- расход дизельного топлива  $35 + 2N$  т/ч;
- температура дизельного топлива на входе в аппарат  $104^{\circ}\text{C}$ , на выходе  $43^{\circ}\text{C}$ ;
- рабочее давление дизельного топлива  $0,1$  МПа;
- температура охлаждающего воздуха на входе  $26^{\circ}\text{C}$ ;
- тип оребрения – накатное;
- число рядов – автоматический выбор, число ходов – автоматический выбор, длина трубы – автоматический выбор;
- допустимые потери давления по дизельному топливу  $4000$  кПа;
- тип расчета Обобщенный.

Рассчитайте характеристики аппарата для коэффициентов оребрения  $9$ ;  $14,6$ ;  $20$ .

1. Для каждого коэффициента оребрения примите шаг ребра  $2$  мм;  $2,4$  мм;  $2,8$  мм;  $3,2$  мм;  $3,6$  мм.

Результаты расчета представьте в виде графической зависимости (количество аппаратов  $\cdot$  площадь теплообменной поверхности /  $(1 + \text{коэффициент запаса} / 100)$ ) от шага ребра (три кривые на одном графике).

2. Для каждого коэффициента оребрения примите высоту ребра  $5$ ,  $9$ ,  $11$ ,  $15$ ,  $19$  мм. При этом шаг труб примите  $S_1 = S_2' = 1,134 \cdot \text{диаметр оребрения}$  наружный.

Результаты расчета представьте в виде графической зависимости (количество аппаратов  $\cdot$  площадь теплообменной поверхности /  $(1 + \text{коэффициент запаса} / 100)$ ) от высоты ребра (три кривые на одном графике).

## Лабораторная работа № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРА

Выполните тепловой и гидравлический расчет для аппарата АВГ для охлаждения дизельного топлива атмосферным воздухом. Исходные данные:

- расход дизельного топлива  $35 + 2N$  т/ч;
- температура дизельного топлива на входе в аппарат  $104^{\circ}\text{C}$ , на выходе  $43^{\circ}\text{C}$ ;
- рабочее давление дизельного топлива  $0,1$  МПа;
- температура охлаждающего воздуха на входе  $26^{\circ}\text{C}$ ;
- тип оребрения *KLM*;
- число рядов – автоматический выбор, число ходов – автоматический выбор, длина трубы – автоматический выбор;
- допустимые потери давления по дизельному топливу  $4000$  кПа;
- тип расчета Обобщенный.

Рассчитайте характеристики аппарата для коэффициентов оребрения 17, 20, 22.

Для каждого коэффициента оребрения примите частоту вращения вентилятора 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 об/мин.

Результаты расчета представьте в виде графической зависимости (коэффициент теплопередачи аппарата / мощность вентилятора) от частоты вращения вентилятора (три кривые на одном графике).

Аналогичные расчеты выполните для аппарата 2АВГ-75 и постройте график.

## Лабораторная работа № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ШАГА ТРУБ В ТРУБНОМ ПУЧКЕ

Выполните тепловой и гидравлический расчет для аппарата АВГ для охлаждения дизельного топлива атмосферным воздухом. Исходные данные:

- расход дизельного топлива  $35 + 2N$  т/ч;
- температура дизельного топлива на входе в аппарат  $104^{\circ}\text{C}$ , на выходе  $43^{\circ}\text{C}$ ;
- рабочее давление дизельного топлива  $0,1$  МПа;
- температура охлаждающего воздуха на входе  $26^{\circ}\text{C}$ ;
- тип оребрения *KLM*;
- число рядов – автоматический выбор, число ходов – автоматический выбор, длина трубы – автоматический выбор;
- допустимые потери давления по дизельному топливу  $4000$  кПа;
- тип расчета Обобщенный.

Рассчитайте характеристики аппарата для коэффициентов оребрения 17, 20, 22.

Для каждого коэффициента оребрения примите шаг между трубами в трубном пучке 58, 60, 62, 64, 66, 68, 70 мм.

Результаты расчета представьте в виде графической зависимости (коэффициент теплопередачи аппарата / мощность вентилятора) от шага между трубами (три кривые на одном графике).

Аналогичные расчеты выполните для аппарата 2АВГ-75 и постройте график.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов, А. А. Пакет прикладных программ Flow Vision / А. А. Аксенов, А. В. Гудзовский // Труды МФТИ. Сер. аэрофизика и прикладная математика. – М.: МФТИ, 1998. – С. 45–56.
2. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа / Т. В. Кондранин [и др.]. – М.: МФТИ, 2005. – 104 с.
3. Прандтль, Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль – М.: Ижевск: R&C Dynamics, 2000. – 576 с.
4. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
5. Седов, Л. И. Механика сплошной среды: в 2 т. / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1983. – Т. 1. – 528 с.
6. Сухоцкий, А. Б. Вторичные энергетические ресурсы. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / А. Б. Сухоцкий. – Минск: БГТУ, 2012. – 90 с.
7. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.
8. Примеры расчетов нестандартизированных эффективных теплообменников / под ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. – СПб.: Недра, 2000. – 300 с.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Составитель **Сухоцкий** Альберт Борисович

Редактор *Ю. А. Ирхина*  
Компьютерная верстка *Я. Ч. Болблт*  
Корректор *Ю. А. Ирхина*

Издатель:  
УО «Белорусский государственный  
технологический университет».  
ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.  
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.