

**Ваганов Александр Борисович,**

доктор технических наук, профессор кафедры теории корабля и гидромеханики, ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева», г. Нижний Новгород  
[ab\\_vaganov@land.ru](mailto:ab_vaganov@land.ru)



**Краснокутский Игорь Дмитриевич,**

кандидат технических наук, доцент кафедры теории корабля и гидромеханики, ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева», г. Нижний Новгород  
[ngtu\\_pool@mail.ru](mailto:ngtu_pool@mail.ru)

### Применение методов вычислительной гидродинамики в курсах машиностроительной гидравлики

**Аннотация.** В статье излагаются методические основы преподавания механики жидкости и газа в ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева» (НГТУ) на основе физического и математического моделирования стационарного процесса движения жидкости в трубопроводах, в простейших гидравлических сопротивлениях и в свободных потоках. Студенты выполняют лабораторные работы по физическому моделированию на универсальном гидравлическом стенде и работы по математическому моделированию на персональных компьютерах.

**Ключевые слова:** жидкость, линия тока, скорость, давление, напор, расход, стационарный процесс, физическое моделирование, математическое моделирование, метод конечных объёмов.

**Раздел:** (01) педагогика; история педагогики и образования; теория и методика обучения и воспитания (по предметным областям).

В рамках преподавания общетехнических дисциплин: «Гидравлика», «Механика жидкости и газа», «Аэрогидромеханика» на кафедре «Аэрогидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов» наряду с традиционными методами преподавания с использованием лабораторных стендов с физическими моделями, дополнительно решаются следующие новые задачи:

- ознакомление с современными методами численных расчетов;
- овладение навыками выполнения вычислительных экспериментов.

Изучение указанных дисциплин имеет своей целью овладение основами знаний в области технической гидромеханики и их применение к анализу рабочих процессов в гидравлических и пневматических системах, гидромашинах, гидродинамических передачах и гидроприводах. В ходе учебного процесса студенты наряду с теоретическим познанием предмета получают практические навыки выполнения гидравлических испытаний и экспериментов, наиболее часто встречающихся в инженерной практике. Изучение элементов курса вычислительной гидродинамики также является необходимым для ознакомления студентов с современными численными методами расчета гидродинамических характеристик, для развития у них практических навыков подобных инженерных расчетов.

Комбинированный лабораторный стенд используется для выполнения лабораторных работ по названным выше дисциплинам [1]. На стенде для ряда объектов (прямые

длинные трубопроводы постоянного сечения, канал переменного сечения, различные местные сопротивления, насадки для истечения жидкости, центробежный насос), геометрические характеристики которых известны, студентам предоставляется возможность измерения расхода и потенциального напора в характерных сечениях. По этим данным студенты, изучившие теорию [2, 3], экспериментально определяют гидродинамические характеристики изучаемых объектов (коэффициенты гидравлического трения, коэффициенты сопротивления, коэффициенты истечения и другие). Истечение из отверстий и насадков происходит в атмосферу, при этом скорость на выходе определяется косвенно на основе соотношений кинематики движения материальной точки в поле действия сил тяжести без учёта силы сопротивления воздуха:

$$\begin{cases} x = v \cdot t - \text{горизонтальное перемещение;} \\ y = g \cdot t^2 / 2 - \text{вертикальное перемещение.} \end{cases} \quad (1)$$

Из системы уравнений (1), исключив время  $t$  и замерив координаты произвольной точки траектории движения жидкой частицы (струи), вычисляем скорость

$$v = x (g / (2 y))^{0,5} \quad (2)$$

Эксперименты проводятся для стационарного движения жидкости. В этом случае методика определения гидродинамических характеристик основывается на уравнении Бернулли и уравнении неразрывности для несжимаемой жидкости [2]:

$$z_1 + p_1 / (\rho g) + \alpha v_1^2 / (2 g) = z_2 + p_2 / (\rho g) + \alpha v_2^2 / (2 g) + \sum h \quad (3)$$

$$Q = v_i S_i = \text{const} \quad (4)$$

Потери напора  $\sum h$  в этом случае определяются из уравнений (4) и (5) на основе замеров потенциальных напоров и расхода. Значения коэффициентов местных сопротивлений и коэффициента потерь на трение по длине вычисляются на основании формулы Вейсбаха-Дарси [2]:

$$\zeta = (\sum h \cdot 2 g) / v^2 \quad (5)$$

$$\lambda = (\sum h \cdot 2 g d) / (L v^2) \quad (6)$$

Гидродинамические коэффициенты скорости и расхода определяются по результатам соответствующих измерений:

$$\varphi = v / (2 g H_{\text{пр}})^{0,5} \quad (7)$$

Значение коэффициента сжатия струи вычисляется на основе уравнения связи коэффициентов истечения:

$$\varepsilon = \mu / \varphi \quad (8)$$

В ходе выполнения лабораторных работ студенты получают навыки работы с гидравлическими аппаратами, гидравлическими машинами и измерительными приборами (пьезометрами, манометрами и ротаметрами). Работа на комбинированном стенде позволяет уменьшить затраты времени на выполнение измерений (3–5 минут) и изменять расход в широких пределах. Благодаря этому в течение одного занятия (2 по 45 минут) на стенде, после вводного инструктажа, могут выполнить измерения 15 студентов (индивидуальная работа) или 15 пар студентов.

Недостатком лабораторных работ на комбинированном стенде является отсутствие визуализации линий тока, отсутствие информации о поле скоростей и о поле

давлений. Этот недостаток компенсируется с помощью математического моделирования потока жидкости в исследуемых объектах.

Расчётные алгоритмы программного комплекса Open FOAM [4], являющегося открытым пакетом, основаны на применении метода конечных разностей и его разновидности – метода конечных объёмов. Он может быть применен для определения гидродинамических характеристик различных течений. Компьютерный анализ течения жидкости включает в себя следующие основные шаги:

1. Создание геометрической модели (сложных границ области жидкости).
2. Задание свойств жидкости, физических условий моделирования течения.
3. Задание исходной расчетной области и соответствующей сетки.
4. Задание граничных условий.
5. Проведение расчета.
6. Просмотр результатов расчета в графической форме («визуализация» результатов расчетов) и сохранение данных в файлы (см. рис. 1–8).

В Open FOAM не представлены в явном виде касательные напряжения  $\tau$ . Сопротивление канала обусловлено действием как  $\tau$  (сопротивления трения), так и действием  $p$  (сопротивление давления). Поэтому определение потерь энергии в канале осуществляется на основе закона количества движения по разности давлений на входе и на выходе из расчетной области.

В ParaView (просмотрщике) результат расчета представлен в виде полей давлений и скорости в цветном образе. Имеется шкала, подводя которую в любую точку, определим величину давления или скорости.

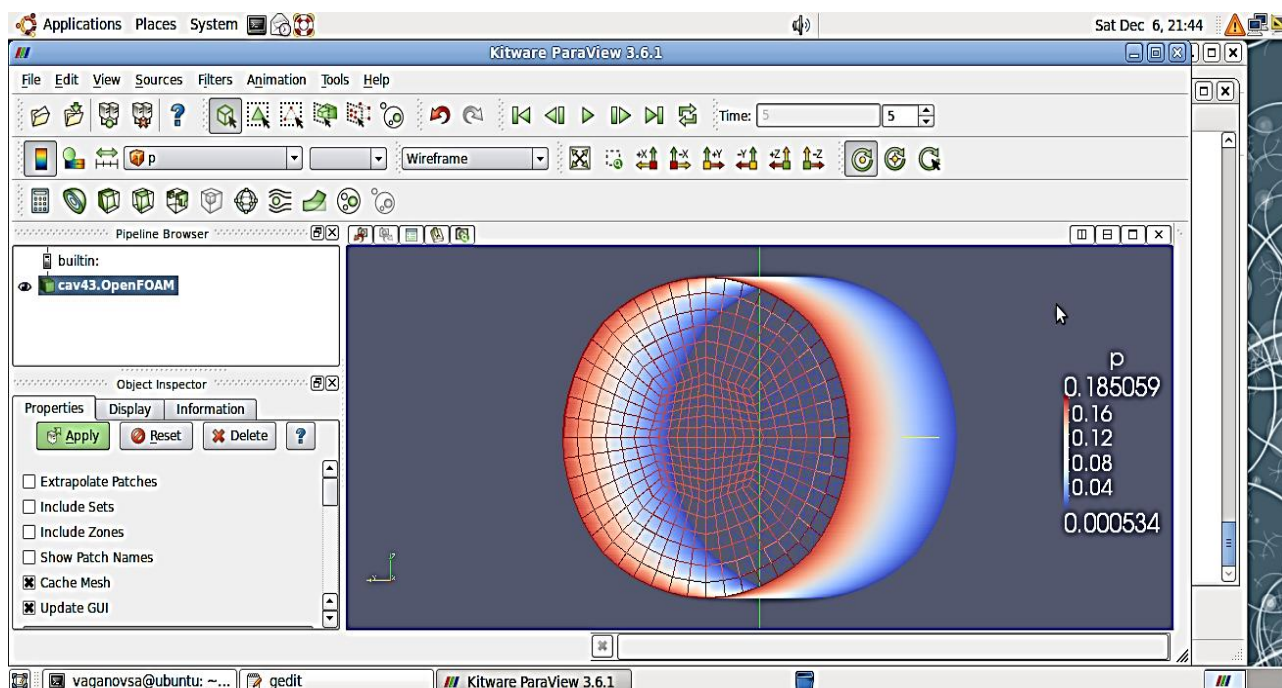


Рис. 1. Пример сетки расчетной области для трубы

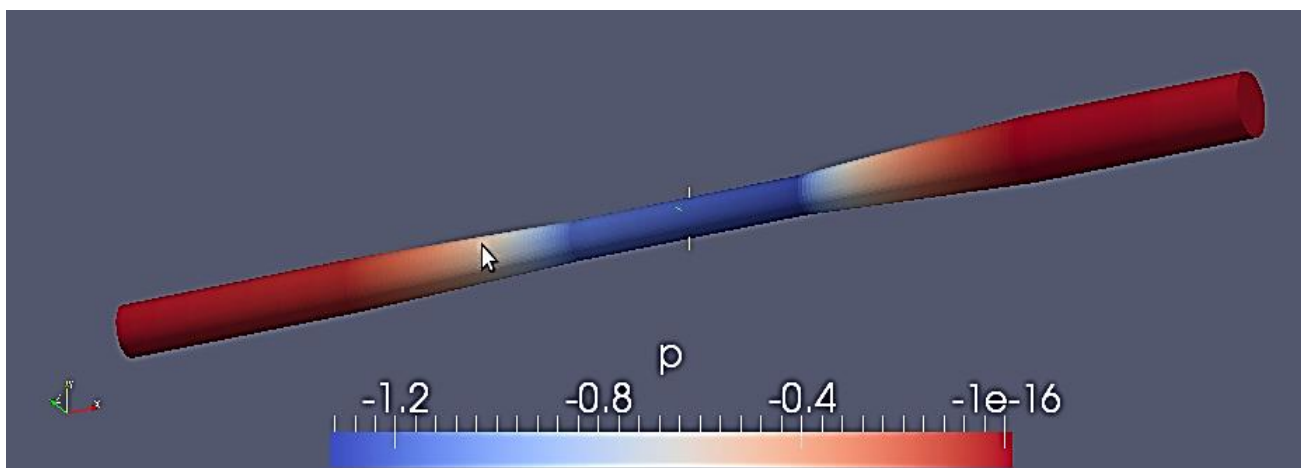


Рис. 2 а) Пример расчетной области для трубы переменного по длине сечения поле давлений

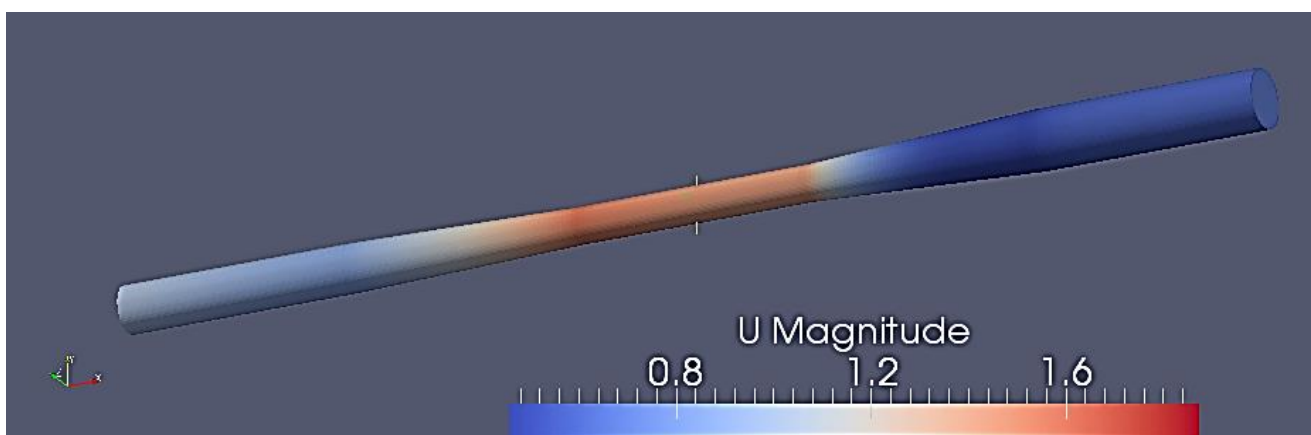


Рис. 2 б) Пример расчетной области для трубы переменного по длине сечения поле скорости

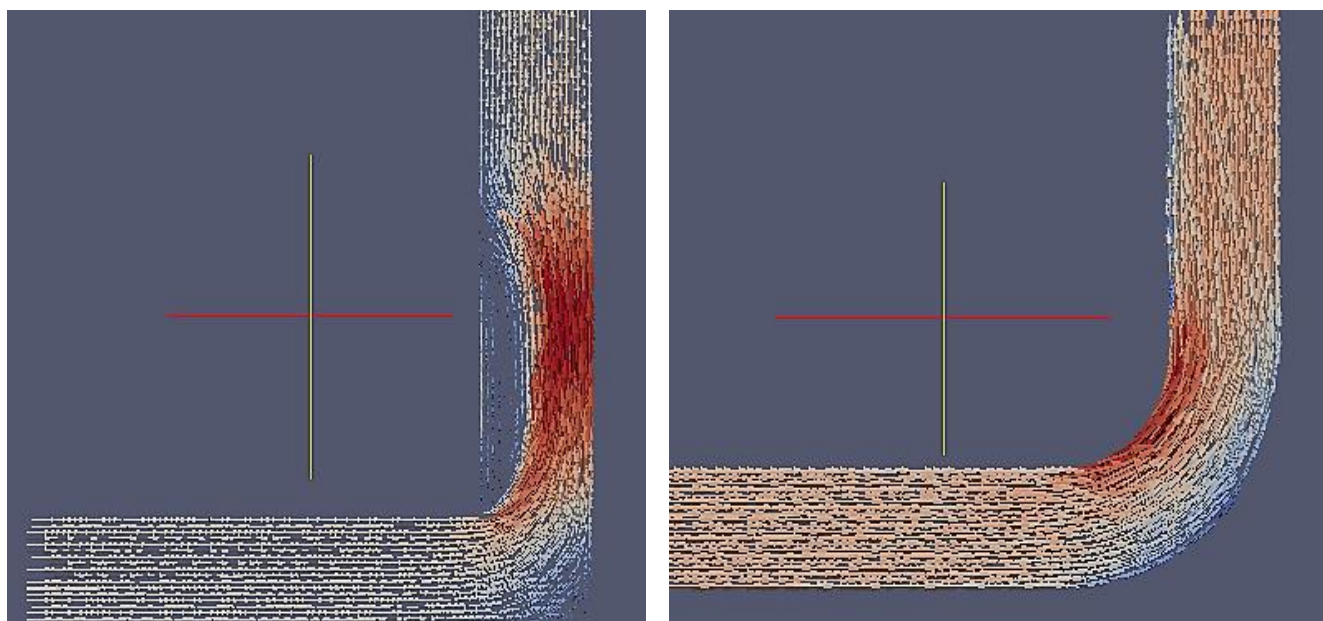


Рис.3. Поворот на 90°

а) резкий поворот канала

б) плавный поворот канала



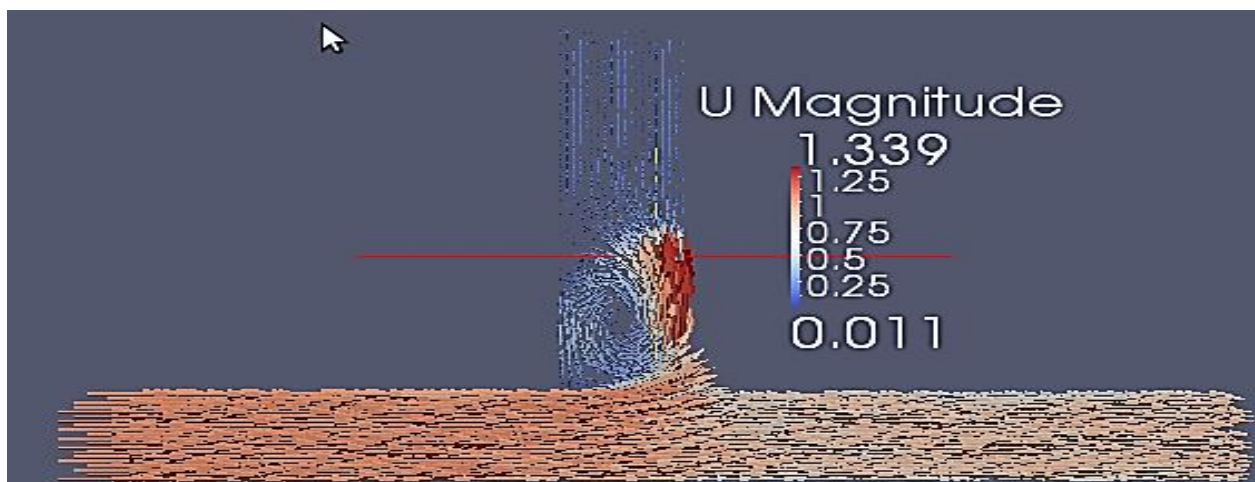


Рис.4. Поле скоростей в тройнике

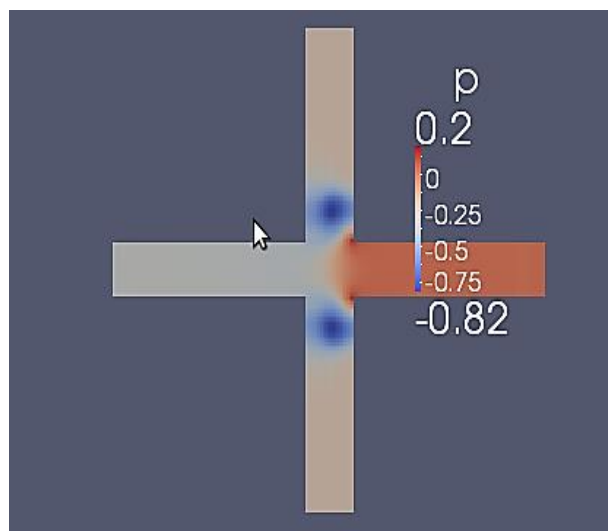
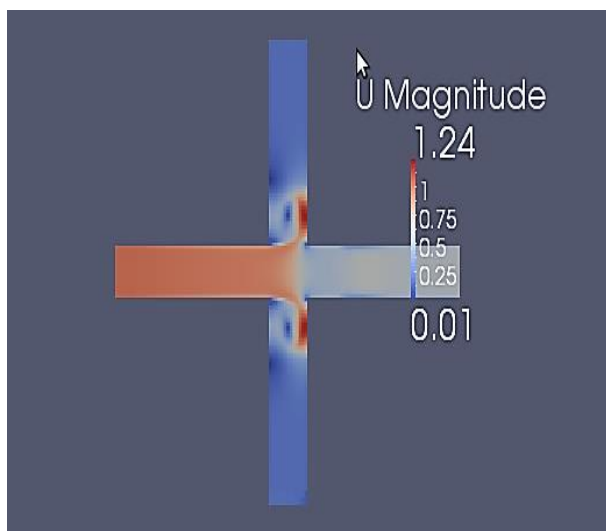


Рис.5. Движение жидкости в крестовине

а) поле скоростей в крестовине

б) поле давления в крестовине

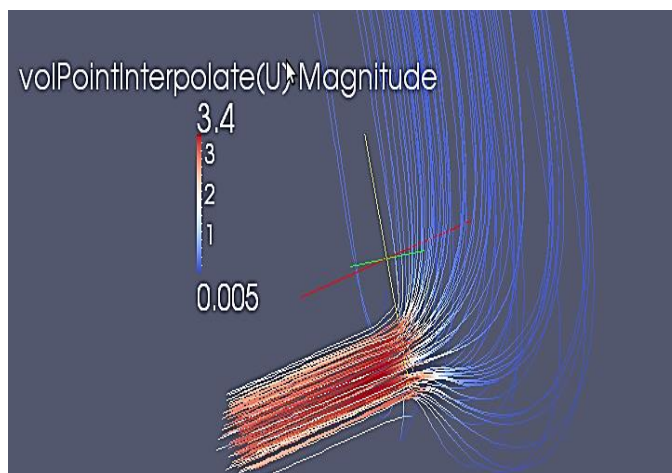
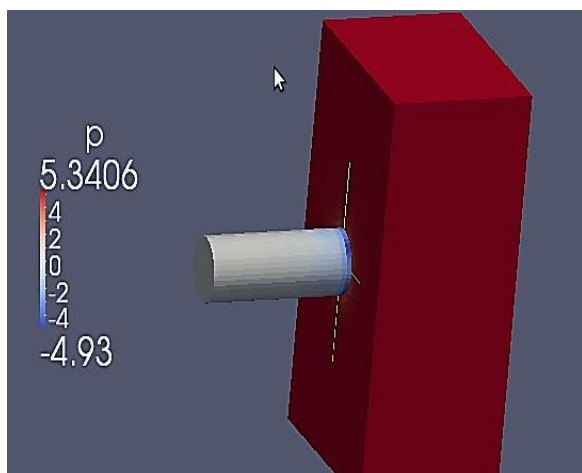


Рис.6. Истечение жидкости через внешний цилиндрический насадок

а) граничные поверхности

б) линии тока

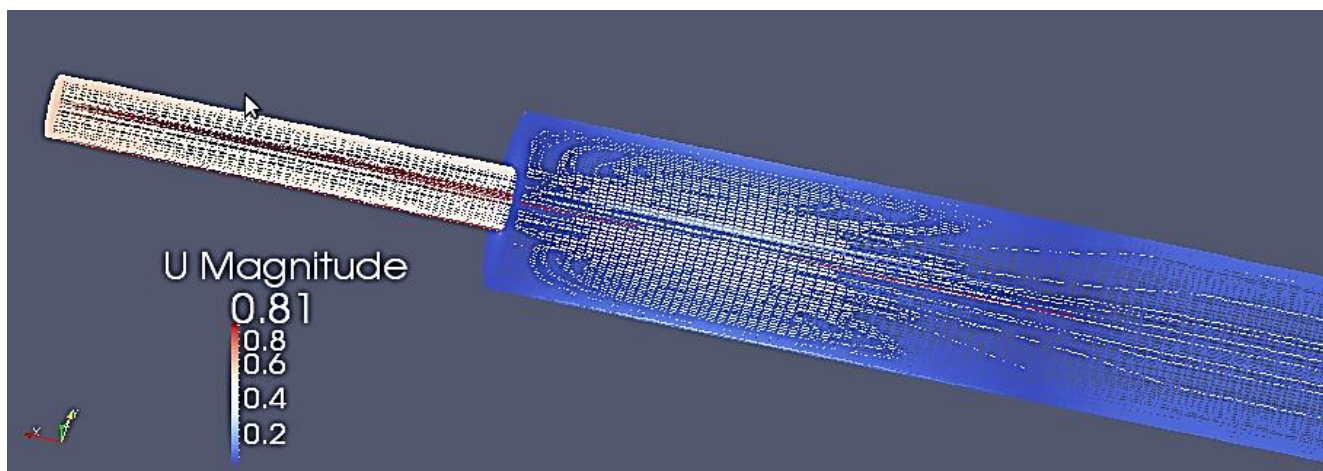


Рис.7. Линии тока при внезапном расширении трубы

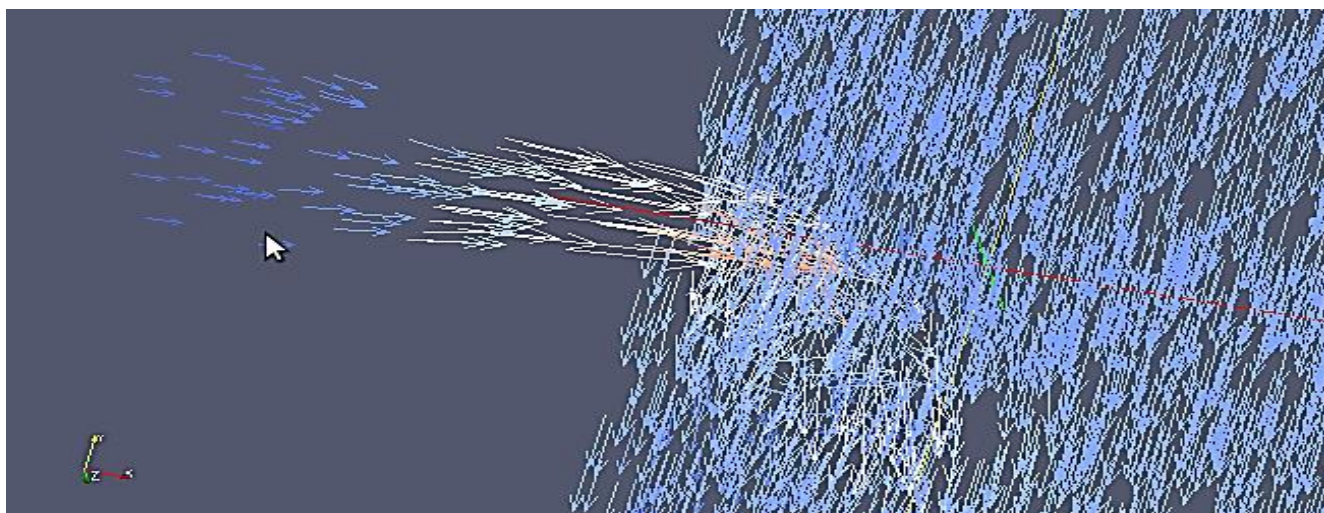


Рис.8. Векторное поле скорости при входе трубы в канал с потоком

Сетка генерируется модулем `blockMesh` на основании описания сетки в словаре `blockMeshDict` путем запуска в терминальной консоли из каталога примера простой команды: `blockMesh`. OpenFOAM всегда работает в 3 мерной декартовой системе координат и все геометрические конфигурации производятся в 3 измерениях. В блочной конструкции показанной на рис. 9 генератор сеток, поставляемый с OpenFOAM, – `blockMesh`, создает сетки, используя команды из описания определенного в словаре ввода. Словарь `blockMeshDict` расположен в каталоге `constant/polyMesh`.

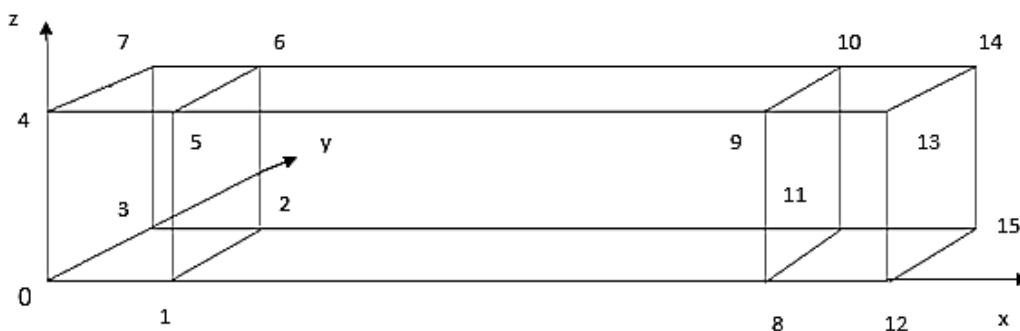


Рис. 9. Блочная структура области течения

Нижне, в качестве примера, приведён файл blockMeshDict для трубы прямоугольного сечения. Восклицательные знаки обозначают конец строки кода и должны быть удалены при использовании файла.

```

/*-----*- C++ -*/
| \ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ / O peration | Version: 1.6 |
| \ / A nd | Web: http://www.OpenFOAM.org |
| \ M anipulation | |
/*-----*/
FoamFile{! version 2.0;! format ascii;!
class dictionary;! object blockMeshDict;!
}!! * Болван ПРЯМОУГОЛЬНОЙ трубы * !!convertToMeters 1.0000;!vertices!
(!!! * 0 * !! - номер вершин блоков! (0 0 0) !! - координаты вершин блоков!! * 1 * !! (1 0 0)!! * 2 * !!
(1 1 0)!! * 3 * !! (0 1 0)!
!! * 4 * !! (0 0 1)!! * 5 * !! (1 0 1)!! * 6 * !! (1 1 1)!
!! * 7 * !! (0 1 1)!! * 8 * !! (1 1 0 0)!
!! * 9 * !! (1 1 0 1)!! * 10 * !! (1 1 1 1)!! * 11 * !!
(1 1 0 1)!! * 12 * !! (1 2 0 0)!! * 13 * !!
(1 2 0 1)!! * 14 * !! (1 2 1 1)!! * 15 * !! (1 2 1 0)!;!
Blocks{(!!! * 0 * !! -> 16 000!
hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (10 20 20) simpleGrading (0.5 1 1)
!! * 1 * !! -> 160 000
hex (1 8 11 2 5 9 10 6) (200 20 20) simpleGrading (1 1 1)
!! * 2 * !! -> 16 000
hex (8 12 15 11 9 13 14 10) (10 20 20) simpleGrading (2 1 1)
);!edges{(!);! Patches{(! patch inlet! (! (0 4 7 3)! )!
!! * НЕподвижные нижняя, верхняя и боковые грани трубы
wall movingWall! (! (1 2 11 8)! (1 8 9 5)!
(2 6 10 11)! (5 9 10 6)! )!
!! * боковые грани разгонных участков! wall fixedWalls ! (!
(0 1 5 4)! (3 7 6 2)! (8 12 13 9)! (11 10 14 15)!
)!!! * верхние грани разгонных участков ! wall upperWall! (!
(4 5 6 7)! (9 13 14 10)! )!
!! * нижние грани разгонных участков! wall lowerWall! (!
(0 3 2 1)! (8 11 15 12)! )!! * выход * !! !
patch outlet! (! (12 15 14 13)! )!
empty frontAndBack! (! )! )! mergePatchPairs! (! )!
!! ***** //
  
```

Файл содержит блок вершин (x, y, z координаты точек) (block vertices). Затем в нём определяются сами блоки (blocks), используя введенные выше метки или имена вершин (the vertex labels) и номера ячеек (cells) внутри них. Далее определяются поверхности для задания граничных условий (the boundary patches).

Сетка генерируется при запуске генератора blockMesh, использующим файл blockMeshDict. Запуск на выполнение производится внутри директории задачи. Это делается набором команды на терминале: blockMesh. На рис. 10 показана сетка расчетной области, правильность создания которой контролируется студентом при ее просмотре.

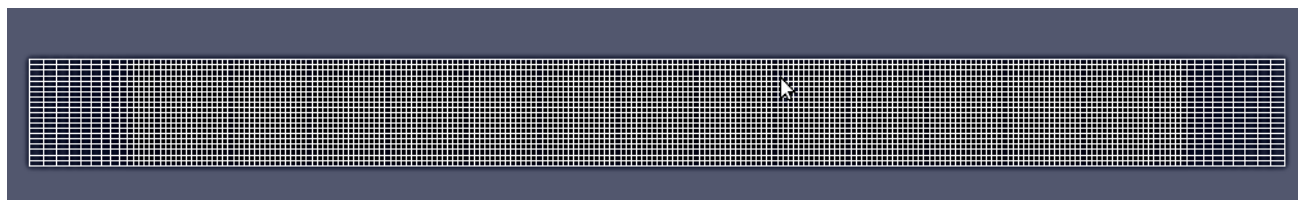


Рис. 10. Сетка расчетной области трубы



Касательные напряжения зависят от вязкости. Значение кинематической вязкости, задаётся и хранится в файле `transportProperties` [4]. Пользователь может проверить, что кинематическая вязкость задается правильно, открыв файл словаря `transportProperties`, чтобы увидеть или отредактировать вводимые величины.

Параметры  $k$  и  $\varepsilon$  модели турбулентности задаются при помощи оценки изменяющейся компоненты скорости  $U$ :

$$k = 0,5 (U U) \quad (9)$$

$$\varepsilon = (C_\mu^{0,75} k^{1,5}) / L \quad (10)$$

где  $C_\mu$  является константой для « $k - \varepsilon$ » модели (принята равной 0,09);  $L$  – характерный линейный размер « $k - \varepsilon$ » модели турбулентности.

В декартовой системе координат,  $k$  задается следующей формулой:

$$k = 0,5 (U_x^2 + U_y^2 + U_z^2) \quad (11)$$

где  $U_x$ ,  $U_y$  и  $U_z$  – изменяющиеся компоненты скорости в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно.

Для данного примера границы состоят только из стенок, разбитые на 4 группы поверхностей названных: (1) `movingWall` – неподвижные нижняя, верхняя и боковые грани трубы; (2) `fixedWalls` – боковые грани разгонных участков; (3) `upperWall` – верхние грани разгонных участков; (4) `lowerWall` – нижние грани разгонных участков. На стенках заданы граничные условия `zeroGradient` нулевой производной к нормали для давления  $p$ , что означает «нормальный градиент давления равен нулю».

В этом примере начальные поля заданы однородными, постоянными. В примере давление является кинематическим, и как для несжимаемой среды, абсолютное значение его не имеет значения (во всех уравнениях нет самого давления, а только его производные), поэтому оно задается нулевым значением.

Входные данные, относящиеся к контролю времени, чтению и записи данных решения считываются из файла `controlDict`. Пользователь должен ознакомиться с данным файлом. Для запуска необходимо установить время начала и конца, а также шаг по времени.

Проведение физического и математического моделирования для перечисленных выше объектов дополняют друг друга. Студенты на гидравлическом стенде экспериментально определяют характеристики гидродинамических объектов и могут сравнить их со справочными данными [5]. Математическое моделирование в `Open FOAM` позволяет получить поле скоростей и поле давлений. Изложенный подход позволяет формировать у обучающихся более полное и глубокое представление об изучаемых гидродинамических процессах.

### Ссылки на источники

1. Краснокутский И. Д., Рабинович М. Е. Комбинированный стенд для лабораторных работ по гидравлике // Концепт. – 2012. – № 4 (апрель). – ART 1244. – URL: <http://e-koncept.ru/2012/1244.htm>.
2. Войткунский Я. И., Фаддеев Ю. И., Федяевский К. К. Гидромеханика. – Л., Судостроение. – 1982. – 456 с.
3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
4. `OpenFOAM` – 1.6. Справочное руководство кода `OpenFOAM` для вычислительной гидродинамики с лицензией открытого исходного кода (The Open Source CFD Toolbox). Руководство пользователя. Версия 1.6. (Перевод на русский). 2011.
5. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.



**Alexander Vaganov,**

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E.Alekseyev, Nizhny Novgorod  
[ab\\_vaganov@land.ru](mailto:ab_vaganov@land.ru)

**Igor Krasnokutsky,**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E.Alekseyev, Nizhny Novgorod  
[ngtu\\_pool@mail.ru](mailto:ngtu_pool@mail.ru)

### Methods of computational fluid dynamics in engineering hydraulics courses

**Abstract.** The paper presents the methodological foundations of teaching the mechanics of fluids at Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseyev, based on physical and mathematical modeling of stationary process flow in pipelines, simplest hydraulic resistance and free flows. Students perform laboratory work on physical modeling on universal hydraulic stand and mathematical modeling practical work on personal computers.

**Keywords:** liquid, current line, velocity, pressure, flow, stationary process, physical modeling, mathematical modeling, finite volumes.

### References

1. Krasnokutskiy, I. D. & Rabinovich, M. E. *Kombinirovannyiy stend dlya laboratornyih rabot po gidravlike* // Kontsept. – 2012. – # 4 (April). – ART 1244. – URL: <http://e-koncept.ru/2012/1244.htm> (in Russian).
2. Voytkunskiy, Ya. I., Faddeev, Yu. I. & Fedyaevskiy, K. K. *Gidromekhanika*. – L., Sudostroenie. – 1982. – 456 p. (in Russian).
3. Loytsyanskiy, L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza*. – M.: Drofa, 2003. – 840 p. (in Russian).
4. OpenFOAM – 1.6. Spravochnoe rukovodstvo koda OpenFOAM dlya vyichislitelnoy gidrodinamiki s litsenziei otkryitogo ishodnogo koda (The Open Source CFD Toolbox). Rukovodstvo polzovate-lya. Versiya 1.6. (Perevod na russkiy). 2011 (in Russian).
5. Idelchik, I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* / Pod red. M.O.Shteynberga. – M.: Mashinostroenie, 1992. – 672 p. (in Russian).

### Рекомендовано к публикации:

Горевым П. М., кандидатом педагогических наук,  
 главным редактором журнала «Концепт»

Поступила в редакцию <i>Received</i>	08.04.15	Получена положительная рецензия <i>Received a positive review</i>	10.04.15
Принята к публикации <i>Accepted for publication</i>	10.04.15	Опубликована <i>Published</i>	26.07.15



[www.e-koncept.ru](http://www.e-koncept.ru)

© Концепт, научно-методический электронный журнал, 2015

© Ваганов А. Б., Краснокутский И. Д., 2015