

УДК 532.5: УДК 519.6

**С.Л. Сьянов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

## **ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ НАПОРА В ТРУБЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ**

Проведено экспериментальное исследование потерь напора при движении жидкой среды в трубе, содержащей несколько местных гидравлических сопротивлений. Местные гидравлические сопротивления представляли собой угольник, внезапное расширение, внезапное сужение, муфту и внезапный поворот. Экспериментальная установка также включала в себя пьезометры, ротаметр, напорный и сливной баки, насос, биметаллический термометр и систему вентилей. Взаимное расположение элементов представлено на гидравлической схеме экспериментальной установки. В качестве жидкой среды использована вода. Спроектирована физическая и объемная геометрическая модель движения жидкости. Выбрана тетраэдральная модель построения объемной сетки. Выбор физических параметров соответствовал турбулентному режиму течения, постоянной плотности, стационарному режиму течения с заданным потоком массы на входном сечении трубопровода. Для численного исследования использован метод контрольных объемов аппроксимации уравнений Навье-Стокса. Моделирование сделано в программном комплексе STAR-CCM+. Найдены поля распределения давлений и скорости движущейся жидкой среды. Установлена возможность точного определения коэффициентов местных гидравлических сопротивлений для тел сложной геометрической формы.

**Ключевые слова:** моделирование по методу контрольных объемов, STAR-CCM+, объемное течение, гидравлические сопротивления.

**S.L. Syanov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH THE PRESSURE DROP IN A PIPE OF VARIABLE CROSS SECTION**

Experimental research of the pressure drop in the flow of fluid in a pipe that has several local hydraulic resistance. The local hydraulic resistance were the elbow, the sudden expansion, sudden contraction, coupling and sudden turn. The experimental setup also included piezometers, variable area flowmeter, pressure and drain tanks, pump, bimetal thermometer, and a system of valves. The relative position of the elements shown in the hydraulic diagram of the experimental setup. As the liquid medium used water. Designed physical and 3D model of the fluid. Selected tetrahedral mesh model of building bulk. Choice of physical parameters correspond turbulent flow, constant density, steady-state flow with a given mass flow at the inlet section of the pipeline. Volume control method of approximation of the Navier-Stokes equations used for the numerical simulation. Simulation done in the software STAR-CCM+. Found a field of pressure distribution and velocity of the moving fluid. The possibility of an accurate determination of the coefficients local hydraulic resistance of bodies of complex geometry.

**Keywords:** control volume simulation, STAR-CCM+, three-dimensional flow, hydraulic resistances.

Традиционно, в отличие от гидромеханики, гидравлика характеризуется особым подходом к изучению явлений течения жидкостей; она устанавливает приближенные зависимости, ограничиваясь во многих случаях рассмотрением одномерного движения, широко используя при этом эксперимент как в лабораторных, так и в натуральных условиях [1–4].

Упрощения, положенные в основу описания поведения жидкости во многом определили ход исторического развития гидравлики. Сведение уравнений Навье–Стокса до уровня уравнений Бернулли привело к необходимости для нахождения давления и скорости в потоке вводить понятие гидравлических сопротивлений или потерь напора как отдельного дополнительного элемента уравнений [4–8].

Практическое значение гидравлики возросло в связи с потребностями современной техники в решении вопросов транспортирования жидкостей и газов различного назначения и использования их для разнообразных целей. Если ранее в гидравлике изучалась лишь одна жидкость – вода, то в современных условиях все большее внимание уделяется изучению закономерностей движения вязких жидкостей (нефти и ее продуктов), газов, неоднородных и так называемых неньютоновских жидкостей. Меняются и методы исследования и решения гидравлических задач. Сравнительно недавно в гидравлике основное место отводилось чисто эмпирическим зависимостям, справедливым только для воды и часто лишь в узких пределах изменения скоростей, температур, геометрических параметров потока; теперь все большее значение приобретают закономерности общего порядка, действительные для всех жидкостей, отвечающие требованиям теории подобия. При этом отдельные случаи могут рассматриваться как следствие обобщенных закономерностей. Постепенно гидравлика превращается в один из прикладных разделов общей науки о движении жидкостей – механики жидкости.

Значительно выросшие в начале XXI в. вычислительные мощности настольных и кластерных систем усилили тенденцию к симбиозу гидравлики и механики жидкости. Натурные эксперименты стало возможным заменить численным моделированием, проецируя полученные результаты на область гидравлики.

Рассмотрим устройство экспериментальной установки (рис. 1).

Установка состоит из горизонтально расположенного трубопровода, состоящего из труб 2, 4, 6, 8, 10 диаметром 36 мм, трубы 5 диа-

метром 81 мм, угольника 3, муфты 7 и резкого поворота 9, к которым присоединены шесть пьезометров П1–П6, ротаметр РТ1. Таким образом, трубопровод содержит пять местных гидравлических сопротивлений: угольник, внезапное расширение, внезапное сужение, муфту и резкий поворот. Основные размеры местных гидравлических сопротивлений приведены в таблице.

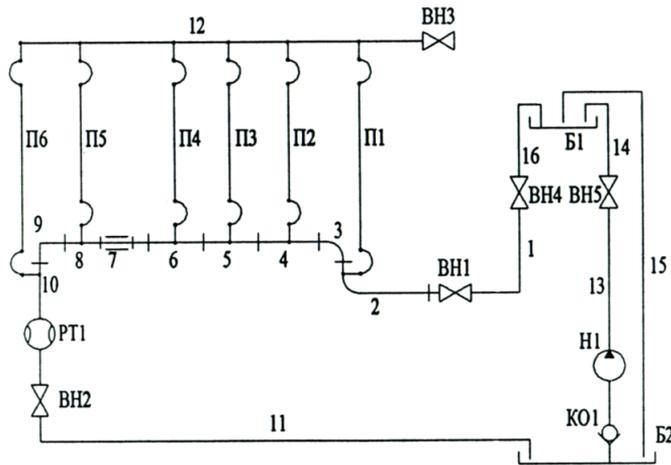


Рис. 1. Гидравлическая схема экспериментальной установки

### Геометрические характеристики местных гидравлических сопротивлений

№ п/п	Местное сопротивление	Основные размеры
1	Угольник	$d = 39\text{ мм}; \delta = 90^\circ$
2	Внезапное расширение	$d = 36\text{ мм}; D = 81\text{ мм}$
3	Внезапное сужение	$D = 81\text{ мм}; d = 36\text{ мм}$
4	Муфта	$d = 39\text{ мм}$
5	Внезапный поворот	$\delta = 90^\circ$

Верхние концы пьезометров присоединены к воздушному коллектору 12, который через вентиль ВН3 соединен с атмосферой.

Трубопровод одним концом присоединен через вентиль ВН1 к напорному баку системы обратного водоснабжения. Другой конец трубопровода после ротаметра через вентиль ВН2 и трубу 11 соединен напрямую со сливным баком системы обратного водоснабжения. Вентильми ВН1 и ВН2 можно регулировать расход воды в трубопроводе. После вентильа ВН2 установлен биметаллический термометр.

К установке вода подводится по трубе 1 от напорного бака Б1 системы оборотного водоснабжения. В баке Б1 с помощью насоса Н1 и переливной трубы 15 поддерживается неизменный уровень воды, и, таким образом, при любом открытии вентилей ВН1 и ВН2 обеспечивается постоянный расход потока в исследуемой трубе с местными сопротивлениями. Вода поступает в трубу 2 по трубе 1, через входной вентиль ВН1. Вентильями ВН1 и ВН2 регулируется расход воды через трубу. Пьезометры П1-П6 измеряют пьезометрический напор в шести сечениях исследуемой трубы до и после каждого местного сопротивления.

Для численного моделирования течения жидкости в трубе будем использовать метод контрольных объемов для записи основных законов сохранения [9–11]. Отправной точкой метода контрольных объемов является интегральная формулировка законов сохранения массы, импульса, энергии и др. Балансовые соотношения записываются для небольшого контрольного объема; их дискретный аналог получается суммированием по всем граням выделенного объема потоков массы, импульса и т.д., вычисленных по каким-либо квадратурным формулам. Поскольку интегральная формулировка законов сохранения не накладывает ограничений на форму контрольного объема, метод контрольных объемов пригоден для дискретизации уравнений гидрогазодинамики как на структурированных, так и на неструктурированных сетках с различной формой ячеек, что полностью решает проблему сложной геометрии расчетной области.

Начало XXI в. ознаменовалось лидирующим положением этого метода решения задач гидрогазодинамики и конвективного теплообмена в областях сложной геометрии по сравнению с методом конечных разностей и методом конечных элементов. Практически большинство ведущих разработчиков CAE-систем внедрили метод контрольных объемов в свои программные комплексы. Использование этого метода позволило одному из лидеров CAE-систем в области гидрогазодинамики компании CD-adapco выпускать несколько релизов своих программных продуктов в год. При этом быстро реализуются новые физические модели поведения и взаимодействия объектов различной природы. Флагман компании STAR-CCM+.

В Star-Design построим эквивалентную 3D-модель экспериментального участка трубопровода (рис. 2).

Удалим из 3D-модели муфту 7 (см. рис. 1) как участок, соединяющий одинаковые диаметры труб. Анализ влияния подобного удаления проведем из экспериментальных данных.

Экспортируем модель в STAR-CCM+ (рис. 3).

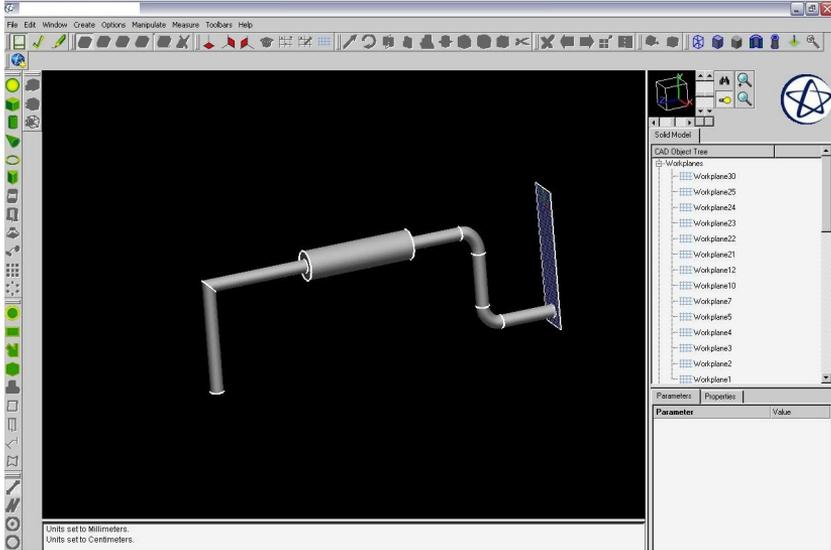


Рис. 2. Трубопровод с участками местных сопротивлений

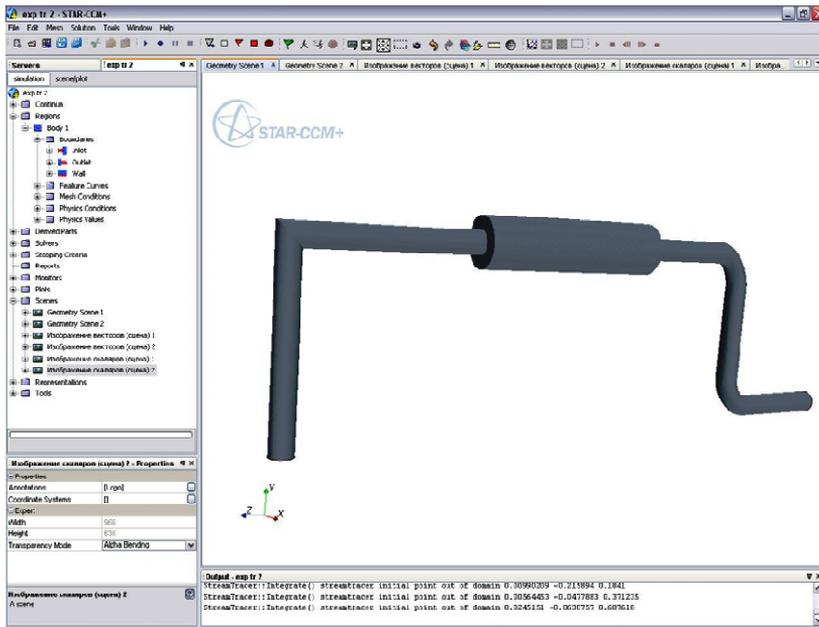


Рис. 3. Экспортированная 3D-модель трубопровода в проекте STAR-CCM+

Выбираем тетраэдральную модель построения объемной сетки (рис. 4).

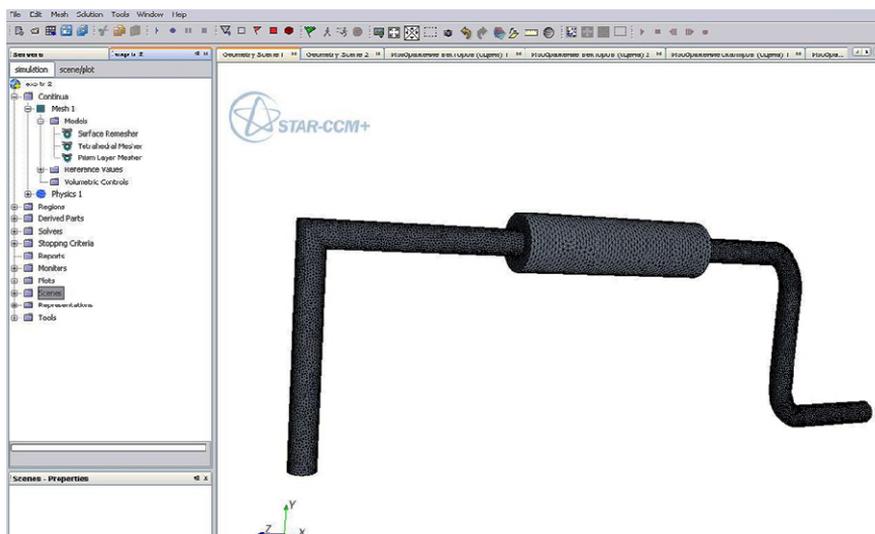


Рис. 4. Разбивка объема на тетраэдры

Устанавливаем следующие модели физики для жидкости (вода): турбулентный режим, постоянная плотность, стационарный режим, заданный поток массы на входе (рис. 5).

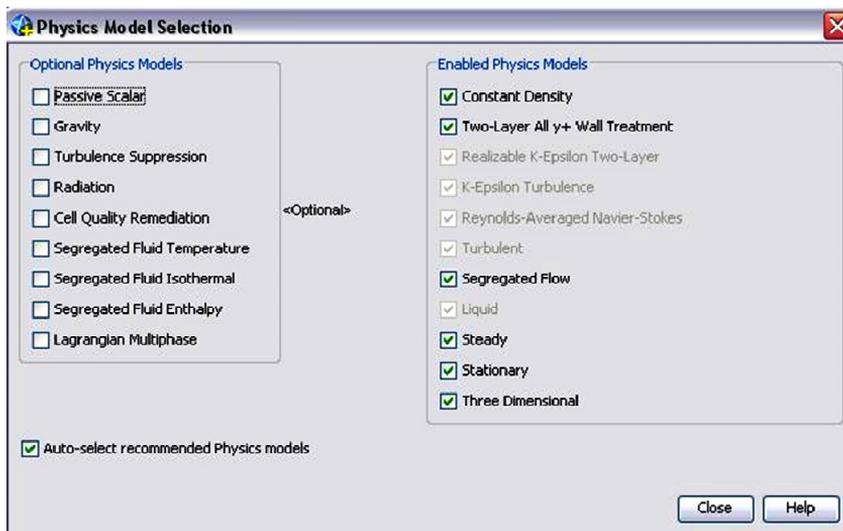


Рис. 5. Расчетные физические модели

Для отображения полученных данных о скоростях и давлениях созданы векторные и скалярные сцены.

На рис. 6 представлены поля изменения относительного давления в трубопроводе.

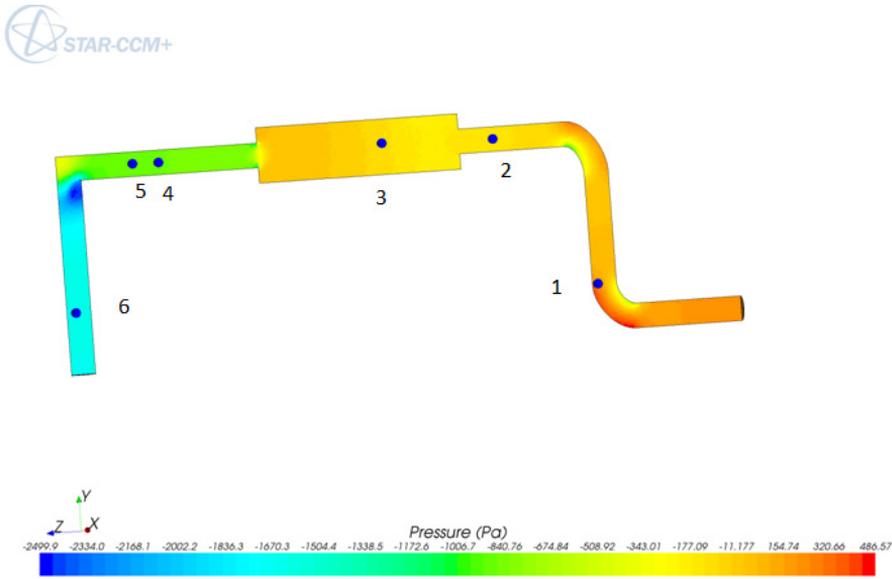


Рис. 6. Расчетные поля изменения давлений

Точки 1, 2, 3, 4, 5, 6 (рис. 6) соответствуют пьезометрам П1, П2, П3, П4, П5, П6 на схеме установки (см. рис. 1). Угольник 3 (см. рис. 1) в 3D-модели был заменен на поворот. Для учета величины дополнительных к повороту потерь, возникающих на участке 3 (см. рис. 1) под влиянием стенок трубы, из 3D-модели исключили муфту 7 (см. рис. 1). Разница давлений между сечениями представлена на рис. 7.

Повышенная разница между экспериментальными и расчетными данными между сечениями 1 и 2 обусловлена заменой в 3D-модели угольника 3 на плавный поворот. При этом в реальности происходит падение давления за счет толщины стенки трубы приблизительно на 180 Па. С учетом этой потери напора относительная погрешность в точках 1–2 не превышает 6%. Для точек 3–4 и 5–6 погрешность не превышает 4%.

На рис. 8 представлены поля изменения относительной скорости в трубопроводе.

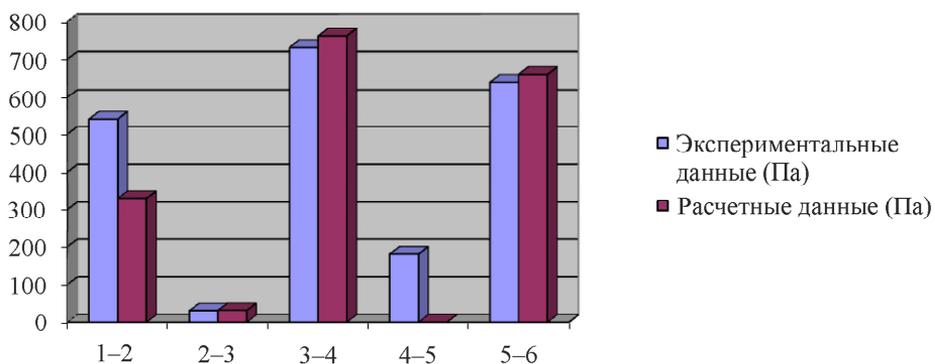


Рис. 7. Сравнительные данные изменения давления в контрольных точках

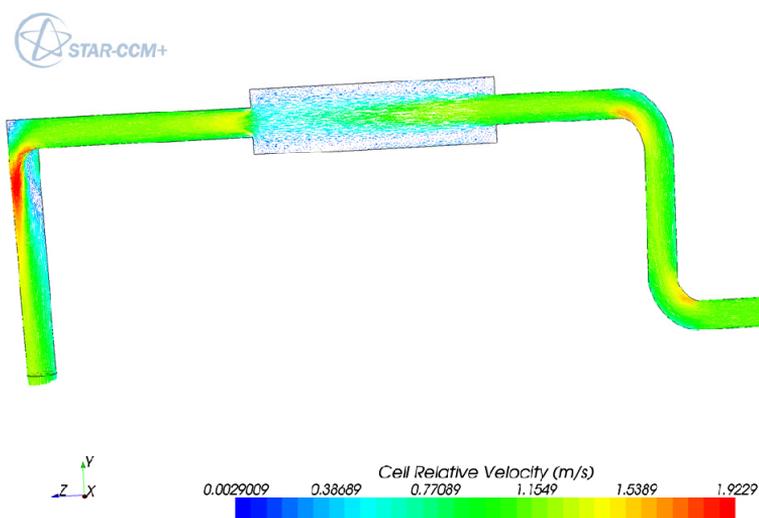


Рис. 8. Расчетные поля изменения скоростей

Анализ потока в характерных точках геометрии трубы соответствует физической картине течения.

Таким образом, представлены сравнительные результаты численного и экспериментального определения давления и скорости потока жидкости в трубе переменного диаметра с искажениями формы по методу контрольных объемов. Получено хорошее соответствие результатов определения полей давлений по методу контрольных объемов.

### Библиографический список

1. Prasuhn A.L. Fundamentals of Hydraulic Engineering. – New York: Holt, Rinehart, and Winston, 1987. – 215 p.
2. Chanson H. Hydraulic Engineering in the 21st Century: Where to? // *Journal of Hydraulic Research*. – 2007. – Vol. 45, no. 3. – P. 291–301.
3. Cassidy J.J., Chaudhry M.H., Roberson J.A. Hydraulic Engineering. – John Wiley & Sons, 1998. – 672 p.
4. Finnemore J.E., Franzini J.B. Fluid Mechanics with Engineering Applications. – Boston: McGraw-Hill, 2009. – 790 p.
5. Welty J.R. Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer. – Chichester: Wiley, 2008. – 711 p.
6. Geankoplis C.J. Transport Processes and Separation Process Principles // Upper Saddle River. – NJ: Prentice Hall, 2009. – 1026 p.
7. Manning F.S., Thompson R.E. Oilfield Processing of Petroleum. Vol. 1. Natural Gas, PennWell Books, 1991. – 420 p.
8. De Nevers N. Fluid Mechanics. – Addison-Wesley Pub. Co, 1970. – 514 p.
9. Voller V.R. Basic Control Volume Finite Element Methods for Fluids and Solids. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2009. – 185 p.
10. Botte G.G., Ritter J.A., White R.E. Comparison of finite difference and control volume methods for solving differential equations // *Computers and Chemical Engineering*. – 2000. – Vol. 24. – P. 2633–2654.
11. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. – New York: Hemisphere Publishing, 1980. – 197 p.

### References

1. Prasuhn A.L. Fundamentals of Hydraulic Engineering. New York: Holt, Rinehart, and Winston, 1987, 215 p.
2. Chanson H. Hydraulic Engineering in the 21st Century: Where to? *Journal of Hydraulic Research*, 2007, vol. 45, no. 3, pp. 291-301.
3. Cassidy J.J., Chaudhry M.H., Roberson J.A. Hydraulic Engineering. John Wiley & Sons, 1998, 672 p.
4. Finnemore J.E., Franzini J.B. Fluid Mechanics with Engineering Applications. Boston: McGraw-Hill, 2009, 790 p.
5. Welty J.R. Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer. Chichester: Wiley, 2008, 711 p.

6. Geankoplis C.J. Transport Processes and Separation Process Principles. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2009, 1026 p.

7. Manning F.S., Thompson Richard E. Oilfield Processing of Petroleum. Vol. 1. Natural Gas, PennWell Books, 1991, 420 p.

8. De Nevers N. Fluid Mechanics. Addison-Wesley Pub. Co., 1970, 514 p.

9. Voller V.R. Basic Control Volume Finite Element Methods for Fluids and Solids. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009, 185 p.

10. Botte G.G., Ritter J.A., White R.E. Comparison of finite difference and control volume methods for solving differential equations. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, vol. 24, pp. 2633-2654.

11. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere Publishing, 1980, 197 p.

### **Об авторах**

**Сьянов Сергей Леонидович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vmm@pstu.ru).

### **About the authors**

**Syanov Sergey Leonidovich** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Computational Mathematics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: vmm@pstu.ru).

Получено 25.04.13