

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2025, Том 17, № 2 / 2025, Vol. 17, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2025.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/79SAVN225.pdf>

DOI: 10.15862/79SAVN225 (<https://doi.org/10.15862/79SAVN225>)

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Носенко, М. О. Численное моделирование процессов гидродинамики в соединительных элементах трубопровода / М. О. Носенко, Л. Н. Александрова // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/79SAVN225.pdf>. DOI: 10.15862/79SAVN225.

For citation:

Nosenko M.O., Aleksandrova L.N. Numerical modeling of hydrodynamic processes in pipeline connecting elements. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(2): 79SAVN225. Available at: <https://esj.today/PDF/79SAVN225.pdf>. DOI: 10.15862/79SAVN225. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 697.31

Носенко Мария Олеговна

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Высшая школа Промышленного и гражданского строительства
Старший преподаватель
E-mail: Marnosenko@gmail.com
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=178653

Александрова Лариса Николаевна

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Ассистент с ученой степенью кандидат наук
E-mail: 000448@togudv.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1034440

Численное моделирование процессов гидродинамики в соединительных элементах трубопровода

Аннотация. За последние несколько десятилетий был достигнут значительный прогресс в попытках более реалистично моделировать водный поток, доступно большое количество концептуальных моделей для прогнозирования потока. Предметом исследования является вопрос численного моделирования течения потока в трубе круглого сечения с наиболее чаще используемой трубопроводной арматуры — отвода. В статье представлены результаты экспериментального исследования отвода и построены численные имитационные модели с использованием программного обеспечения вычислительной гидродинамики ANSYS FLUENT. Для точного описания модели турбулентности потока жидкости выбрана модель k-ε. Основная цель состоит в том, чтобы оценить производительность реализуемой модели k-ε качественно и количественно при моделировании потока сильно изогнутого воздуховода, где сильно искаженный поток напряжения мог развиваться вблизи стенки воздуховода.

Проведенные исследования показали хорошую корреляцию между физическим экспериментом и результатами моделирования вычислительной гидродинамики.

Решенная задача позволяет сделать вывод, что применение компьютерного моделирования при исследовании и проектировании трубопроводов для строительства и других отраслей является актуальным и перспективным. Глубокое понимание базовых процессов, достижения в численных методах и внедрение все более мощных компьютеров

позволят проводить комплексное моделирование наиболее важных физических процессов движения жидкости в трубопроводах и сооружениях, что создаст возможность более эффективно применять модели для решения различных задач движения потоков в исследованиях и управлении ими.

Ключевые слова: коэффициент местных сопротивлений; отвод; трубопровод; круглая струя; вычислительная гидродинамика; модель k-ε; потери напора

Введение

Строительство и эксплуатация трубопроводов любого назначения и сложности, в том числе и для систем теплоснабжения не могут обходиться без использования соединительных элементов. Основными соединительными деталями трубопроводов различного назначения являются отводы, тройники, клапаны, фланцы, переходы. Перечисленные детали используются для реализации сложных инженерных решений при прокладке систем трубопроводов, для изменения направления потока, транспортируемого вещества, диаметра трубопровода, разветвления потока. Отводы используются чаще, чем другие детали трубопровода, так как они без особых усилий обеспечивают гибкость трубопровода при изменении его направления. Они являются неотъемлемой частью систем водоснабжения, канализации, теплоснабжения, отопления. При установке отводов вместо прямых углов снижается гидравлическое сопротивление трубопровода, уменьшаются потери давления и нагрузка на оборудование.

Известно, что существует два вида потерь давления при движении жидкости: линейные — потери в результате внутреннего трения отдельных струй жидкости между собой и местные потери, связанные с деформацией потока в результате изменения скорости либо по величине, либо по направлению.¹ Местные сопротивления вызывают быстрое изменение структуры и конфигурации потока, что приводит к большим потерям энергии потока. Поэтому использование соединительных деталей в трубопроводах вызывают дополнительные потери к потерям, вызванным потоком жидкости на линейных участках. Пренебрежение влиянием потерь напора может привести к ошибкам до 25 % при оценке диаметров и 7 % при оценке максимальной длины ответвлений [1].

Многообразие конструктивных форм, приводящим к деформациям потока и образованию местных потерь напора, сложность процессов, происходящих в потоке жидкости существенно усложняют анализ этого явления. Коэффициент местного сопротивления ξ зависит не только от вида местного сопротивления, но и от числа Рейнольдса. Исследования показали, что при больших числах Рейнольдса выполняется условие $\xi = \text{const}$ для данного местного сопротивления. Классическим источником значений коэффициентов местных сопротивлений является справочник.² В справочниках значения коэффициентов даются без учета влияния режима движения, ограничиваются однофазным движением ньютоновских жидкостей, а промышленные потоки представляют собой комплекс, включающий несколько фаз (т. е. твердое тело-жидкость, газ-жидкость-твердое тело) или неньютоновские жидкости, поэтому необходимо данные о коэффициентах местного сопротивления считать ориентировочными. Для правильного подбора оборудования при проектировании инженерных систем необходимы достоверные коэффициенты местных сопротивлений и расчеты местных потерь.

¹ Лойцянский Л.Г. Механика жидкостей и газа (7-е изд.). Москва, Дрофа, 2003, 840 с.

Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик, под ред. Штейнберг М.О. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва: Машиностроение, 1992. — 672 с.

² Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик, под ред. Штейнберг М.О. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва: Машиностроение, 1992. — 672 с.

Тщательное изучение литературы показало, что метод определения коэффициентов местного сопротивления носит экспериментальный характер, и является дорогостоящим по сравнению с исследованиями численного моделирования.

В настоящее время развивающаяся вычислительная техника позволяет использовать программные проекты, решающие задачи гидродинамики. Ярким примером является использование CFD-программ (Computational Fluid Dynamics), в связи с чем применение вычислительной гидродинамики в изучении механики жидкости, тепло- и массообмена значительно возросло. «В качестве альтернативы эмпирическим и полуэмпирическим методикам мировым сообществом рассматриваются подходы, в основе которых лежит механика сплошных сред, CFD-методы (Computational Fluid Dynamics), когда система уравнений Навье—Стокса или Рейнольдса решается с помощью численных методов» [2].

Вычислительная гидродинамика (CFD-Computational Fluid Dynamics в англоязычной литературе) — это раздел механики жидкости, который использует численный анализ и структуры данных для анализа и решения задач, связанных с потоками жидкости [3].

Вычислительное гидродинамическое моделирование (CFD) прогнозирует переменные потока, такие как скорость, давление и т. д., путем решения математических уравнений, описывающих их взаимосвязь. Таким образом, точность результатов моделирования зависит от того, насколько хорошо математическая модель или уравнения отражают физику потока. Оценивается точность математической модели путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными результатами. Математическая модель уточняется до разумного согласия между полученными результатами моделирования и экспериментам. Проверенную модель можно с уверенностью использовать для изучения более глубоких физических процессов и предсказать распределение скорости и фазы с высокими пространственными и временными разрешениями сложных промышленных процессов. Таким образом, технология CFD является эффективным и универсальным инструментом для прогнозирования потока жидкости, если физические явления адекватно описываются математической моделью.

Моделирование вычислительной гидродинамики (CFD) возможно использовать в качестве инструмента обучения и исследования студентов по направлению машиностроения, строительства, химической инженерии в рамках курсов гидравлики, гидромеханики, теплопередачи. Это позволит улучшить процесс преподавания и обучения. Считается, что CFD необходимо сделать основной частью учебной программы бакалавриата, поскольку она широко используется в промышленности и академическое сообщество как инструмент проектирования и оптимизации [3–7]. Внедрение курса вычислительной гидродинамики (CFD) может сделать образование в области транспортировки различных жидкостей интересным, поскольку позволяет визуализировать поток, температуру, давление поля [4–7].

Большое количество энергии затрачивается в системах на преодоление сопротивлений в фасонных элементах, связанных с вихреобразованием в них, поэтому более рационально проводить определение потерь путем численного моделирования. Для проведения исследований принят соединительный элемент трубопровода — отвод, изогнутый под углом 90 градусов, изменяющий направление движения потока жидкости.

Целью данной работы является демонстрация использования вычислительной гидродинамики при моделировании потока жидкости для определения коэффициентов местных сопротивлений для расчета потерь давления. Модель выполнена для однофазного течения ньютоновской жидкости через 90° градусный отвод. Хорошее согласие между смоделированными и эмпирическими коэффициентами потерь придает достоверность модели CFD и ее применения для прогнозирования многофазных потоков [4–7].

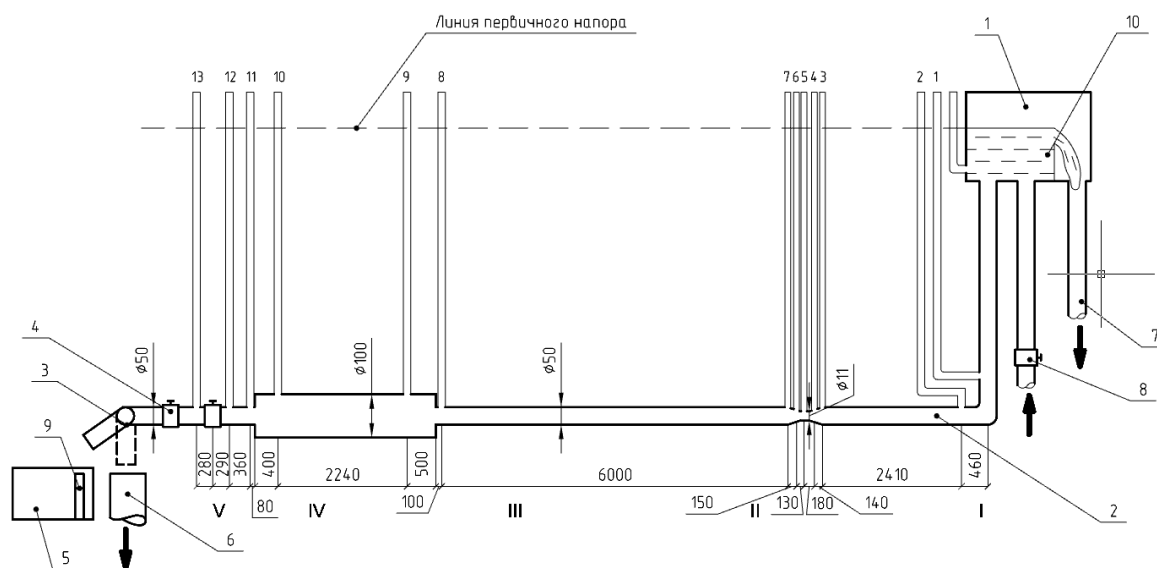
Методология исследования

Исследования проводились с использованием смешанных методов, сочетающих в себе как количественные, так и качественные исследовательские подходы. Во-первых, была рассмотрена научно-техническая литература и получены данные об изучении коэффициентов местного сопротивления и потерь давления. Во-вторых, выполнен натурный эксперимент по определению коэффициента местных сопротивлений на участке трубопровода с отводом. В-третьих, выполнено моделирование с использованием вычислительной гидродинамики (CFD).

В этом исследовании была применена стандартная модель $k-\epsilon$. Она была получена из уравнения Рейнольдса-усредненного Навье-Стокса (RANS), которое вычисляло статическое давление (p) [2].

Экспериментальная модель

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой трубу 2 изменяющегося сечения, в которую вода подается при постоянном напоре из напорного бака 1. По направлению движения воды в установке поток преодолевает пять местных сопротивлений, обозначенных на схеме римскими цифрами: I — колено (плавный поворот); II — плавное сужение-расширение; III — внезапное расширение; IV — внезапное сужение; V — пробковый кран.



1 — напорный бак; 2 — трубопровод; 3 — переключатель слива воды; 4 — кран; 5 — мерный бак; 6, 7 — трубы холостого сброса воды; 8 — задвижка; 9 — водомерное стекло; 10 — переливное устройство

Рисунок 1. Схема экспериментального стенда для определения коэффициентов местных сопротивлений (составлено авторами)

Местные потери определялись по разности показаний пьезометров. Потери напора на отводе равны разности показаний пьезометров 1 и 2.

CFD-Моделирование

Создание геометрии и сетки. Первым шагом в моделирование, является создание геометрии. В этой работе рассматривается отвод на 90 градусов представленный на рисунке 2.

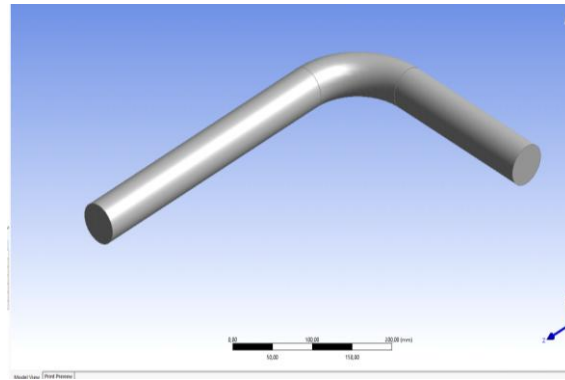


Рисунок 2. Модель отвода на 90 градусов (составлено авторами)

Геометрия модели дублирует геометрию натурной установки. Диаметр трубопровода 50 мм, форма сечения круглая, длина горизонтального участка 2 870 мм, длина вертикального участка 2 000 мм для того, чтобы обеспечить полный развитый поток.

Ключевым вопросом в моделировании потока является создание сетки, поскольку она определяет стабильность и точность прогнозов расчета потока [2].

В данном случае использовались тетраэдрические гибридные ячейки использовались для дискретизации всего потока, как показано на рисунке 3.

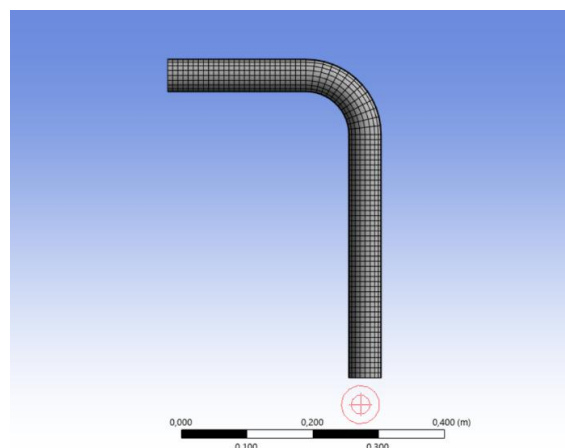


Рисунок 3. Геометрия сетки отвода на 90 градусов (составлено авторами)

Основные уравнения. Уравнения сохранения массы и импульса выражаются следующим образом:

Закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0.$$

Закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau,$$

где:

ρ — плотность;

u — скорость;

p — давление;

τ — тензор вязких напряжений.

Усовершенствованные модели турбулентности, такие как прямое численное моделирование, могут быть полезны для понимания природы турбулентности, но требуют мощной вычислительно мощности. В настоящей работе используется математическая модель трехмерные нелинейные уравнения Навье-Стокса. Обобщенное уравнение отражает законы сохранения и модель турбулентности (k-ε модель турбулентности) [10].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega + \int_{\Omega} V \rho \phi d\vec{V} \cdot n d\vec{S} = \int_{\Omega} \Gamma \text{grad} \phi \cdot n d\vec{S} + \int_{\Omega} q \phi d\Omega,$$

где:

- ϕ — обобщенная переменная $\phi = \{1, U, u, w, \omega, h\}$;
 U, u, w — составляющие скорости вдоль осей X, Y, Z;
 h — энтальпия;
 ρ — плотность;
 Ω — контрольный объем;
 $\vec{V}$ — вектор скорости;
 $\vec{S}$ — вектор площади;
 Γ — циркуляция скорости по контуру;
 $q\phi$ — источниковый член;
 ω — удельная скорость диссипации турбулентной энергии;
 $\frac{\partial}{\partial t}$ — частная производная по времени;
 n — вектор нормали.

Граничные условия. В качестве рабочей среды использовалась водопроводная вода температурой 17 градусов (289 K). Моделирование проводилось путем задания расхода на входе вертикальный участок трубопровода. Диаметр трубопровода принят равным 50 мм, эквивалентная шероховатость равна $k_s = 1$ мм, кинематический коэффициент вязкости воды 0,01. Граничные условия на выходе использовались такие же как на границе выхода.

Результаты и обсуждения

В таблице 1 и 2 представлены результаты лабораторных измерений и компьютерного моделирования.

Таблица 1

Данные измерений в лаборатории и результаты их обработки

Характеристика	Обозначения	Ед. измерения	Номер опыта				
			1	2	3	4	5
Объем воды	W	л	20	20	30	30	30
Время	T	с	11,1	11,6	15,42	18,45	13,75
Расход	Q	л/с	1,8	1,72	1,95	1,63	2,18
Средняя скорость: при d = 50 мм	V	м/с	0,92	0,88	0,99	0,83	1,1
Показания пьезометров	h	см					
1			133	132	138	134	145
2			131,1	130,5	135,6	133	142
Число Рейнольдса при d = 50 мм	Re	—	46 000	44 400	49 500	41 500	55 500
Коэффициент местного сопротивления			0,44	0,38	0,48	0,28	0,48

Составлено авторами

Таблица 2

Данные измерений в модели и результаты их обработки

Характеристика	Обозначения	Ед. измерения	Номер опыта				
			1	2	3	4	5
Расход	Q	л/с	1,8	1,72	1,95	1,63	2,18
Средняя скорость: при d = 50 мм	V	м/с	0,92	0,88	0,99	0,83	1,1
Число Рейнольдса при d = 50 мм	Re	—	46 000	44 000	49 500	41 500	55 500
Коэффициент местного сопротивления			0,46	0,4	0,48	0,34	0,49

Составлено авторами

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что проверенная модель CFD является очень полезным инструментом для определения коэффициента местных потерь любой комбинации соединительных элементов и жидкость/поток. Мощные инструменты постобработки, такие как контурные графики позволяют учащимся визуализировать вклад геометрической формы в величину потери напора на основе детальной картины течения потока.

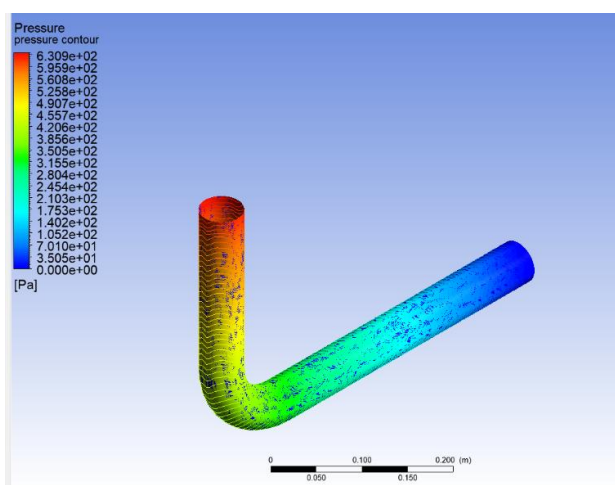


Рисунок 4. Поле распределения давления (составлено авторами)

При сравнении результатов натурного эксперимента и CFD-моделирования отвода, результаты CFD выше. Разница в результатах связана с различными параметрами, такими как сопротивление между слоями, ошибками в снятии показаний и воздействия воздуха на поверхность жидкости [8–10].

Выводы

Применение вычислительной гидродинамики (CFD-моделирования) для оценки потерь давления и коэффициента местного сопротивления трубопроводной арматуры были продемонстрированы на примере лабораторной работы для студентов строительного и механического направления. В работе рассмотрен случай транспортировки жидкости через отвод.

Полученные результаты убедительны, проверенная модель является дешевой альтернативой физических моделей для определения коэффициентов местного сопротивления, а также может быть использована для изучения сложных производственных потоков. Следует отметить быстроту проведения компьютерного эксперимента в отличие от натурного эксперимента. Данные, полученные при моделировании, учитывают все особенности геометрии движения потока, контурные графики, созданные в результате компьютерного моделирования, помогут студентам в визуализации явлений движения жидкости, таких как отрыв пограничного слоя.

Возможные изменения параметров компьютерной модели и сравнение вариантов является большим преимуществом этого метода и позволяет снизить существенно затраты на изготовление физических установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yildirim, G. An assessment of hydraulic design of trickle laterals considering effect of minor losses. *Irrigation and Drainage*, v. 56, p. 399–421, 2007.
<https://doi.org/10.1002/ird.303>.
2. Белова О.В., Волков В.Ю., Скибин А.П., Николаева А.В., Крутиков А.А., Чернышев А.В. Методологические основы CFD-расчетов для поддержки проектирования пневмогидравлических систем // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. № 5(17). <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-osnovy-cfd-raschetov-dlya-podderzhki-proektirovaniya-pnevmogidravlicheskih-sistem> (дата обращения: 16.06.2025).
3. Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications. *Nea/CSNI/R*, (2007)5, 154 p.
4. Левинтан Е.Ю., Шейпак А.А. Численное моделирование взаимного влияния элементов гидравлических систем // *Известия Московского государственного индустриального университета*. — 2009. — № 4(17). — С. 50–55.
5. Гарбарук А.В., Стрелец Х.М., Шур Л.М. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. Санкт-Петербург, Наука и современность: Докл. международной научно-практической конференции. Новосибирск, 2011, с. 260–264.
6. Посохин В.Н., Зиганшин А.М., Мудрисов Д.И. О протяженности зон влияния возмущающих элементов трубопроводных систем. // *Известия КГАСУ*. 2014 № 2(28). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-protyazhennosti-zon-vliyaniya-vozmuschayuschih-elementov-truboprovodnyh-sistem> (дата обращения: 16.06.2025).
7. Посохин В.Н., Зиганшин А.М., Баталов А.В. К определению коэффициентов сопротивлений возмущающих элементов трубопроводных систем // *Известия высших учебных заведений. Строительство*, 2012 № 9. — с.108–112.
8. Коробкова Ю.П., Москаленко В.О. Моделирование струйного взаимодействия круглой струи с дозвуковым сносящим потоком / Ю.П. Коробкова, В.О. Москаленко // *Аэрокосмический научный журнал МГТУ имени Н.Э. Баумана. Электрон. журн*. 2017. № 03. С. 53–63.
9. Посохин, В.Н. О расчете потерь давления в возмущающих элементах трубопроводных систем / В.Н. Посохин, А.М. Зиганшин // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. — 2014. — № 7(151). — С. 76–78. — EDN TWKDOWN.
10. Сазонова, С.А. Формирование математических моделей потокораспределения для гидравлических систем / С.А. Сазонова, Е.А. Сушко, К.А. Скляр // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах*. — 2014. — № 1(3). — С. 36–41. — EDN TFXJVH.

Nosenko Mariia Olegovna

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

E-mail: Marnosenko@gmail.com

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=178653

Aleksandrova Larisa Nikolaevna

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

E-mail: 000448@togudv.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1034440

Numerical modeling of hydrodynamic processes in pipeline connecting elements

Abstract. In the last few years, economic progress has been made in attempts to more realistically model water flow, with a large number of conceptual models available for flow prediction. The subject of the study is the issue of a consistent description of the flow in a circular pipe with the most commonly used pipeline fittings — elbows. The article presents the results of an experimental study of elbows and the construction of numerical ionic models using the ANSYS FLUENT computational fluid dynamics software. The k- ϵ model is chosen to accurately describe the fluid flow turbulence model. The main objective is to evaluate the performance of the implemented k- ϵ model qualitatively and quantitatively in simulating the flow of a strongly curved duct, where a strongly generated flow stress can radiate through the duct cover.

The conducted studies provide a good correlation between the physical experiment and the computational fluid dynamics analysis method.

The solved problem allows us to conclude that the use of computer modeling in training and designing pipelines for construction and other industries is relevant and promising. A deep understanding of the underlying processes, advances in numerous techniques and the introduction of increasingly powerful computers enable comprehensive modeling of the most important fluid flow processes in pipelines and structures, making it possible to more effectively apply the models to solve a variety of problems, flow studies and control.

Keywords: local resistance coefficient; branch; pipeline; round jet; computational fluid dynamics; k- ϵ model; pressure losses