

УДК 532.5:621.646:615.47

Лавирко Юрий Васильевич
канд. техн. наук, доцент,
Казанский государственный архитектурно-строительный
университет (КГАСУ)
Россия, г. Казань

Гарнышева Наталья Олеговна магистр,
Казанский государственный архитектурно-строительный
университет
Россия, г. Казань

КОНТРОЛЬ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ СЖАТОГО КИСЛОРОДА МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация: *АКТУАЛЬНОСТЬ* исследования заключается в том, что в системах медицинского газоснабжения потери давления в соединительных элементах трубопроводов существенно влияют на эффективность и надёжность подачи кислорода пациентам, однако существующие эмпирические данные для расчёта местных сопротивлений (КМС) часто ограничены и не учитывают реальных условий течения сжатого кислорода при рабочих давлениях. Численное моделирование позволяет детально исследовать гидродинамические характеристики течения и оптимизировать конструкцию элементов системы. **ЦЕЛЬ.** Разработать и верифицировать методики численного моделирования течения сжатого медицинского кислорода через тройники различных диаметров с использованием программного комплекса *Ansys Fluent* и определить коэффициенты местного сопротивления для выбора оптимальной геометрии трубопроводной арматуры. Сравнение полученных значений КМС для различных диаметров и анализ влияния геометрии на потери давления. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Рассчитаны

физико-химические параметры сжатого кислорода: плотность $5,25 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $2,09 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Определены коэффициенты местного сопротивления для тройников: при диаметре 15 мм — $\xi \approx 2,08$; 20 мм — $\xi \approx 2,26$; 25 мм — $\xi \approx 2,58$; 32 мм — $\xi \approx 3,72$. Показано, что с увеличением диаметра прохода КМС возрастает, что указывает на снижение эффективности распределения потока в крупногабаритных элементах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная методика численного моделирования позволяет адекватно оценивать гидродинамические характеристики течения сжатого кислорода в тройниках. Наименьшие потери давления наблюдаются в тройниках диаметром 15–20 мм, что подтверждает их оптимальность для использования в медицинских газовых системах.

Ключевые слова: численное моделирование, сжатый кислород, тройники, коэффициент местного сопротивления, гидродинамика, потери давления, оптимизация трубопроводов.

Yuri V. Lavirko
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)
Kazan, Russian Federation

Natalia O. Garnysheva Master's
Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

CONTROL AND INVESTIGATION OF COMPRESSED OXYGEN FLOW USING NUMERICAL SIMULATION METHODS

Abstract: *RELEVANCE. In medical gas supply systems, pressure losses in pipeline connecting elements significantly affect the efficiency and reliability of*

oxygen delivery to patients. Existing empirical data for calculating local resistance coefficients (KMS) are often limited and do not account for the actual flow conditions of compressed oxygen at operating pressures. Numerical modeling allows for a detailed investigation of the hydrodynamic flow characteristics and optimization of system component design. **THE PURPOSE.** To develop and verify a numerical modeling methodology for the flow of compressed medical oxygen through tees of various diameters using the Ansys Fluent software package, and to determine the local resistance coefficients for selecting the optimal geometry of pipeline fittings. **CONCLUSION.** The developed numerical modeling methodology allows for an adequate assessment of the hydrodynamic characteristics of compressed oxygen flow in tees. The lowest pressure losses are observed in tees with a diameter of 15–20 mm, confirming their optimality for use in medical gas systems. The obtained data can be used for the design of energy-efficient pipeline networks for medical gas supply.

Keywords: numerical modeling, compressed oxygen, tees, local resistance coefficient, hydrodynamics, pressure losses, pipeline optimization.

Введение. Медицинский кислород является критически важным ресурсом в современном здравоохранении, применяемым в реанимации, хирургии, терапии и других областях медицины [1]. Подача кислорода осуществляется по централизованным трубопроводным системам, включающим сложные сети с многочисленными соединительными элементами: тройниками, отводами, крестовинами. Надёжность функционирования этих систем напрямую влияет на безопасность пациентов и эффективность лечения.

Согласно требованиям нормативных документов системы медицинского газоснабжения должны обеспечивать стабильное давление и расход кислорода в точках потребления. Однако потери давления в соединительных элементах могут достигать 20–40% от общих потерь в системе [2], что приводит к

необходимости установки дополнительного оборудования (компрессоров, ресиверов) и увеличению энергозатрат.

Традиционные методы расчёта гидравлического сопротивления основаны на использовании эмпирических коэффициентов, приведённых в справочниках [3, 4]. Однако эти данные получены для стандартных условий течения воды или воздуха и не всегда учитывают особенности течения сжатых газов при рабочих давлениях медицинских систем (0,2–0,6 МПа). Кроме того, справочные значения коэффициентов местного сопротивления (КМС) часто даны без указания условий их определения, что снижает достоверность расчётов.

Современные методы вычислительной гидродинамики позволяют детально исследовать структуру течения в сложных геометрических областях [5, 6]. В частности, в работе [7] успешно применён подход моделирования для исследования запылённых потоков в вентиляционных каналах, что подтверждает эффективность данного метода для решения задач определения гидродинамического сопротивления.

Цель исследования заключается в разработке и верификации методики численного моделирования течения сжатого медицинского кислорода через тройники различных диаметров с использованием программного комплекса Ansys Fluent и определение коэффициентов местного сопротивления для оптимизации конструкции трубопроводной арматуры.

Научная значимость работы состоит в уточнении закономерностей формирования гидродинамического сопротивления в тройниковых соединениях при течении сжатого кислорода в диапазоне рабочих давлений медицинских газовых систем.

Практическая значимость исследования заключается в получении достоверных значений КМС, которые могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих систем медицинского газоснабжения для повышения их энергоэффективности и надёжности.

Литературный обзор

Вопросам гидравлического сопротивления в трубопроводных системах посвящены фундаментальные работы И.Е. Идельчика [2, 3], Д.С. Миллера [4], а также Ф.М. Уайта [8], которые заложили основу для расчета потерь давления. В справочных изданиях [3, 4] приведены табличные значения КМС для тройников, полученные для несжимаемой жидкости. Однако, как отмечается в работе [2], при течении сжимаемых газов, особенно при давлениях, отличных от атмосферного, могут возникать дополнительные эффекты, связанные с изменением плотности, что требует корректировки справочных данных.

Современные исследования смещаются в сторону применения методов вычислительной гидродинамики (CFD). В работах [5, 6] подробно описываются подходы к решению задач гидродинамики с использованием коммерческих пакетов, таких как Ansys Fluent. Значительный интерес представляет работа А.М. Зиганшина и соавторов [7], в которой на примере моделирования запыленного воздушного потока в прямом канале была продемонстрирована эффективность использования стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности с расширенным пристеночным моделированием для получения адекватных гидродинамических характеристик. Авторы подчеркивают важность адаптации расчетной сетки и верификации результатов, что особенно актуально для задач с развитыми отрывными течениями.

В последние годы активно развиваются подходы к моделированию течений в элементах трубопроводных систем. Так, в работе [9] исследовалось влияние геометрических параметров тройников на потери давления в системах вентиляции. В исследованиях [10, 11] показана эффективность применения усовершенствованных моделей турбулентности, таких как SST $k-\omega$, для моделирования отрывных течений в каналах сложной геометрии. В работе [12] представлен анализ точности различных CFD-подходов для расчета коэффициентов местного сопротивления, где отмечается, что погрешность

может достигать 10–15% для элементов со сложной геометрией. Современные зарубежные исследования [13, 14] подтверждают, что применение высококачественных сеток и корректный выбор моделей турбулентности позволяют получать результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

Несмотря на наличие работ по моделированию течений в тройниках для воды и воздуха, исследований, посвященных течению сжатого медицинского кислорода при рабочих давлениях (0,4 МПа), крайне мало. Существующие справочные данные [2,4] не учитывают специфических свойств кислорода (вязкость, плотность) при этих условиях, что определяет актуальность и научную новизну настоящего исследования.

Материалы и методы

В рамках настоящего исследования заданы следующие исходные условия: температура газа 20 °С (293 К); давление кислорода 0,4 МПа (абсолютное); газ – кислород высокой чистоты (не менее 99,5%); состояние – сжатый газ в стальной трубопроводной системе.

Физико-химические свойства сжатого кислорода:

Плотность. Для расчета плотности сжатого кислорода при заданных условиях используется уравнение состояния идеального газа [15]:

$$\rho = (P \cdot M) / (R \cdot T), \text{ где} \quad (1)$$

ρ — плотность, кг/м³

$P = 0,4 \text{ МПа} = 400\,000 \text{ Па}$ — избыточное давление

$M = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ — молярная масса кислорода

$R = 8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ — универсальная газовая постоянная

$T = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ К}$ — абсолютная температура

$$\rho = (400000 \cdot 0,032) / (8,314 \cdot 293) \approx 12800 / 2437,9 \approx 5,25 \text{ кг/м}^3$$

Плотность сжатого кислорода при температуре 20°С и давлении 0,4 МПа составляет приблизительно 5,25 кг/м³.

Вязкость. Для расчёта динамической вязкости используется формула Сазерленда[16]:

$$M = \mu_0 \cdot \left(\frac{T}{T^0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{T^0 + C}{T + C}, \text{ где} \quad (2)$$

$\mu_0 = 2,07 \cdot 10^{-5}$ Па — вязкость кислорода при $T_0 = 291$ К

$C = 127$ К — константа Сазерленда для кислорода.

$$M = 2,07 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{293}{291}\right)^{3/2} \cdot \frac{291+127}{293+127} \approx 2,09 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$$

Удельная теплоёмкость при постоянном давлении.

Удельная теплоёмкость при постоянном давлении — один из важнейших термодинамических параметров газа, характеризующий количество тепла, необходимое для повышения температуры единицы массы вещества на один градус при сохранении давления постоянным. Для двухатомных газов, таких как кислород, удельная теплоёмкость в нормальных условиях стабильно приближается к табличному значению и слабо зависит от давления вплоть до 1 Мпа.

Методика оценки

Согласно справочным данным, удельная теплоёмкость кислорода при температуре 20 °С и нормальном давлении составляет:

$$c_p \approx 915 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) [17].$$

Так как в условиях умеренного давления (до 1 Мпа) отклонения от идеального поведения минимальны, для давления 0,4 Мпа принимается то же значение c_p с точностью до 1–2%.

Теплопроводность.

Для оценки используется эмпирическая зависимость, позволяющая учитывать влияние давления на теплопроводность газа:

$$\lambda_p = \lambda_0 \cdot (1 + B\lambda \cdot P) \quad (3)$$

где:

λ_p — теплопроводность кислорода при давлении 0,4 Мпа, Вт/(м·К);

λ_0 — теплопроводность при нормальных условиях (20 °С, 0,1 Мпа), $\lambda_0 = 0,026$ Вт/(м·К);

$B\lambda$ — поправочный коэффициент для кислорода, принимаемый равным 0,010 Мпа⁻¹;

P — избыточное давление, в данном случае 0,4 МПа.

$$\lambda_p = 0,026 \cdot (1 + 0,010 \cdot 0,4) = 0,026 \cdot (1 + 0,004) = 0,026 \cdot 1,004 = 0,0261$$

Вт/(м·К)

Коэффициент теплового расширения

Коэффициент объемного теплового расширения является одной из ключевых характеристик газов, отражающей их склонность к изменению объёма при варьировании температуры. Для идеальных и близких к ним реальных газов этот коэффициент может быть приближённо оценён как величина, обратно пропорциональная абсолютной температуре.

Используется следующая формула:

$$\beta = 1 / T, \quad (4)$$

где:

β — коэффициент объемного теплового расширения, K^{-1} ;

T — температура в Кельвинах, при 20 °С: $T = 293,15$ К.

$$\beta = 1 / 293,15 \approx 3,41 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

Электрическая проводимость

Кислород при нормальных условиях (температура 20 °С и давление до 0,4 МПа) является диэлектриком, то есть веществом, не обладающим свободными носителями заряда в значимых количествах. Вследствие этого его удельная электрическая проводимость принимает чрезвычайно малые значения и может рассматриваться лишь в теоретическом контексте при отсутствии ионизирующих факторов.

Для оценки удельной электрической проводимости используется обратная величина удельного объемного сопротивления:

$$\sigma = 1 / \rho_{уд}, \quad (5)$$

где:

σ — электрическая проводимость, См/м;

$\rho_{уд}$ — удельное объемное сопротивление кислорода.

При стандартных условиях: $\rho_{уд} \approx 10^{14} - 10^{16}$ Ом·м

Следовательно, $\sigma \approx 10^{-16} - 10^{-14}$ См/м

Принимаем среднее значение: $\sigma \approx 10^{-15}$ См/м

Порядок проведения исследования включал следующие этапы:

1. Создаем трёхмерные модели симметричных тройников с внутренними диаметрами 15, 20, 25 и 32 мм созданы в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D. Для обеспечения сопоставимости результатов все модели имеют одинаковые пропорции.

2. Импортируем модель в приложение Discovery Live 2019 R3 для первоначальной настройки условий для исследования.

3. Выбираем условия расчета: воздух, поток внутренней жидкости.

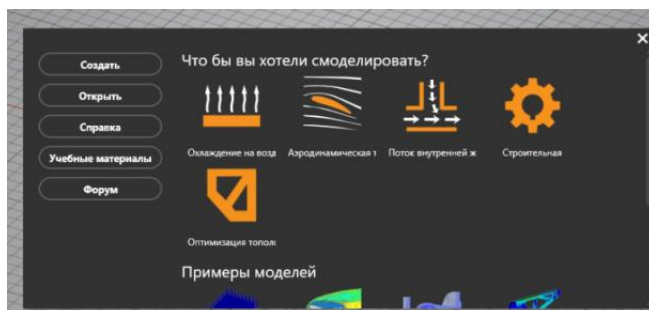


Рис. 1. Граничные условия

4) Вводим рассчитанные параметры (плотность, вязкость, теплопроводность, удельная теплоёмкость, коэффициент теплового расширения, электрическая проводимость) в приложении Discovery Live 2019 R3 при помощи создания нового материала-медицинского газа во вкладке “библиотека материалов”.

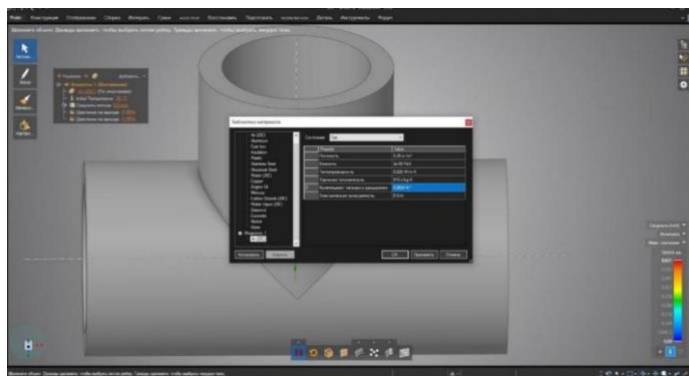


Рис. 2. Настройка физико-химических параметров

Таблица 1

Физико-химические параметры сжатого кислорода при 20 °С и 0,4 МПа

Параметр	Обозначение	Значение
Плотность	ρ	5,25 кг/м ³
Вязкость	μ	$2,09 \cdot 10^{-5}$ Па·с
Теплопроводность	λ	0,026 Вт/(м·К)
Уд. теплоёмкость (при $p=\text{const}$)	c_p	915 Дж/(кг·К)
Коэфф. теплового расширения	α	$3,41 \cdot 10^{-3}$ К ⁻¹
Электрическая проводимость	σ	10^{-15} См/м

5) Настраиваем параметры течения внутри тройника сжатого кислорода (указываем давление на входе 0,4 МПа) и проверяем при помощи графического представления потокораспределения на правильность заданных условий.

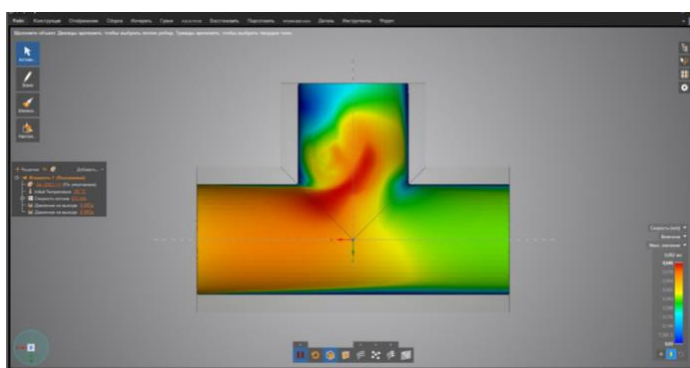


Рис. 3. Графическое изображение течения сжатого кислорода внутри тройника

6) Загружаем файл с настроенными условиями в Workbench 2019 R3(Ansys), выбираем вкладку Fluent Flow(Fluent)

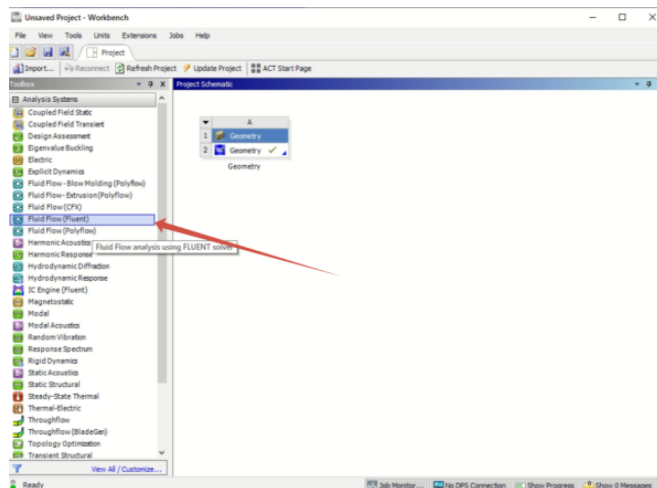


Рис. 4. Fluent Flow(Fluent)

7) Нажимаем на вкладку геометрия (Geometry) и проверяем на правильность и корректность импортированного файла.

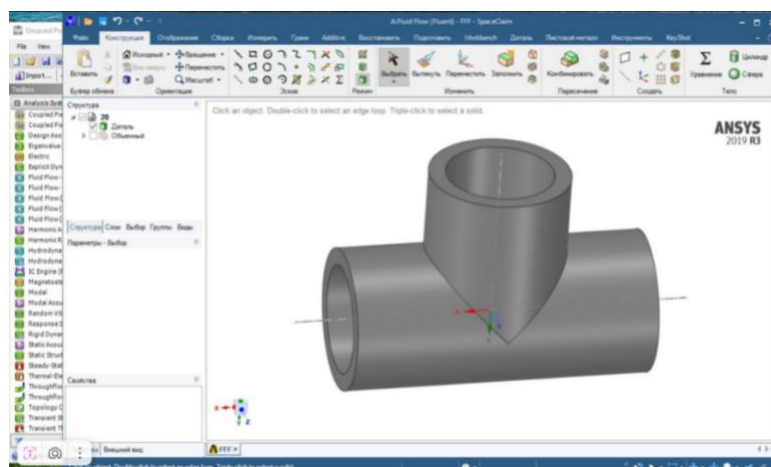


Рис. 5. Геометрия тройника

8) Настраиваем сетку (Mesh), задаем названия для каждой грани нашего исследуемого тройника через параметр “Faced Mesh” и “Named Selections” (входное отверстие-inlet, выходные отверстия-outlet_1, outlet_2, стенки тройника-wall).

Для обеспечения сеточной независимости результатов проведено исследование четырёх вариантов сетки с последовательным измельчением.

Структурированная гексаэдрическая сетка построена в ANSYS Meshing с локальным измельчением в зоне разветвления и у стенок.

Таблица 2

Характеристики вычислительных сеток для тройника D=20 мм

№ сетки	Число ячеек, тыс.	Размер ячейки у стенки, мм	y^+ средний	КМС ξ	Относительное изменение, %
1	250	0,5	45–180	2,41	—
2	850	0,2	22–85	2,28	5,7
3	2 100	0,1	8– 32	2,26	0,9
4	4 500	0,05	4– 15	2,26	0,0

Критерием выбора окончательной сетки стало изменение коэффициента местного сопротивления менее 1% при дальнейшем измельчении. Для всех диаметров тройников выбрана сетка с характеристиками, аналогичными варианту 3.

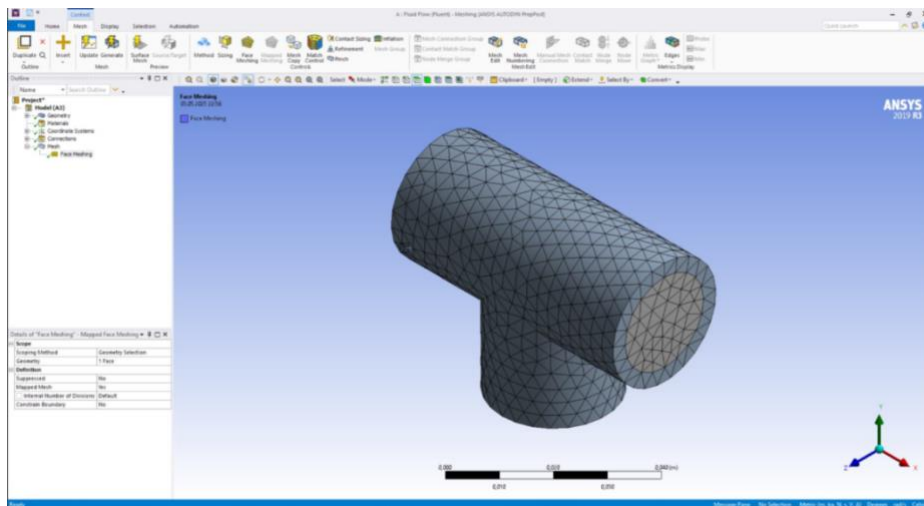


Рис. 6. Сетка (Mesh)

Получаемый итог представлен на рис.6

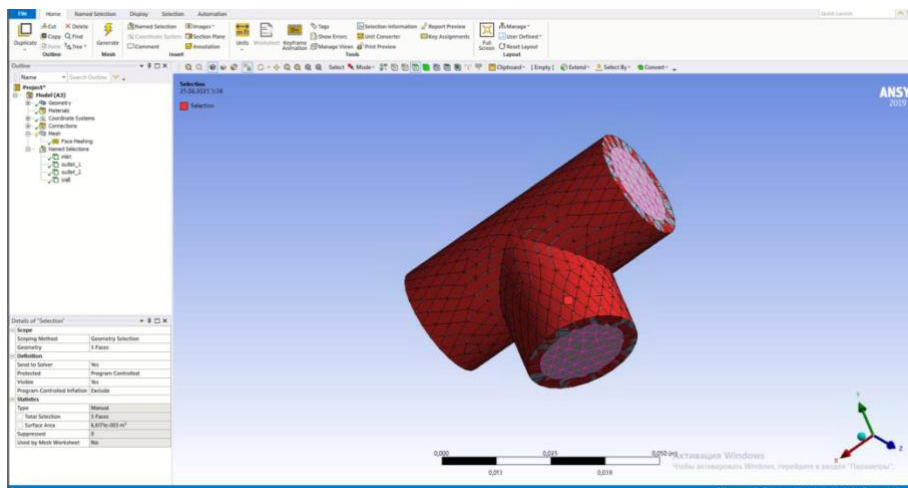


Рис. 7. Проверка заданных условий

9)Обновляем сетку и запускаем программу, нажав на Set Up:

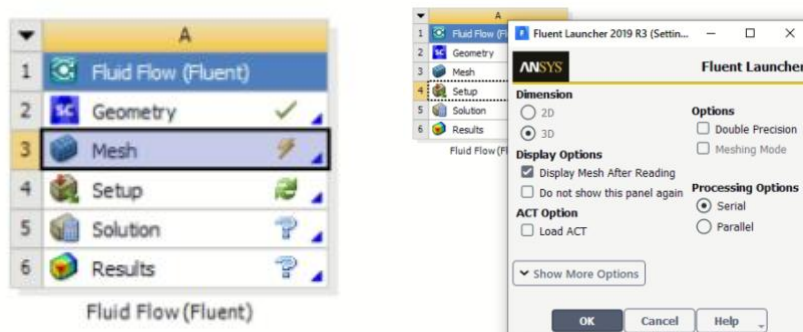


Рис. 8. Настройка параметров

10) Настраиваем в диспетчере задач граничные условия:

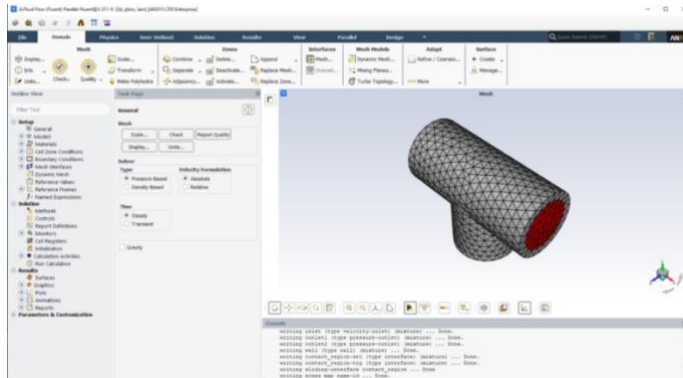


Рис. 9. Настройка граничных условий

-Активируем гравитацию (Gravity).

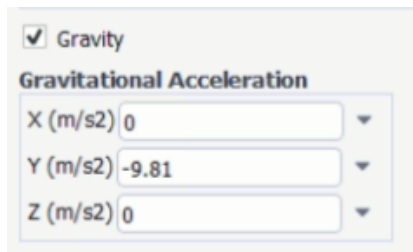


Рис. 10. Параметр “Гравитация”

-В разделе “модели” (Models) меняем в параметре вязкость (Viscous) с ламинарного потока на параметр k-epsilon (2qn) [18].

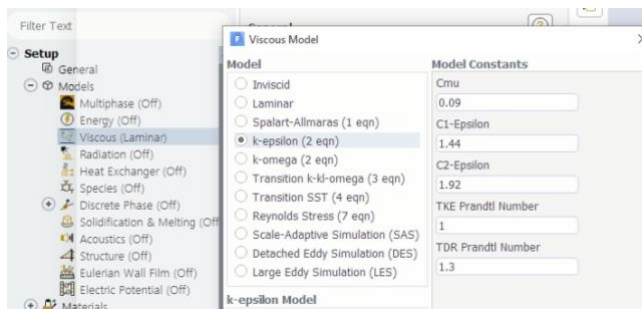


Рис. 11. Параметр k-epsilon (2qn)

- В разделе “материалы” (Materials), выбираем жидкость (Fluid), далее воздух (air) и указываем расчетные параметры плотности и вязкости ($\rho = 5,25 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 2,09 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$).

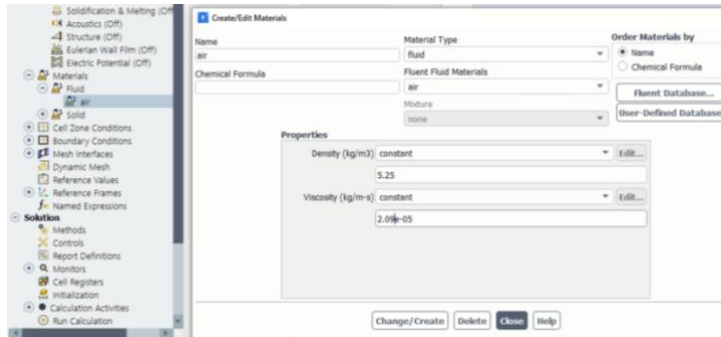


Рис. 12. Настройка параметров материалов

-В разделе Boundary Conditions (граничные условия) выбираем параметр inlet, меняем тип во вкладке (type) на pressure-inlet (напорный выпуск) и подставляем требуемое для исследования давление 0,4 МПа.

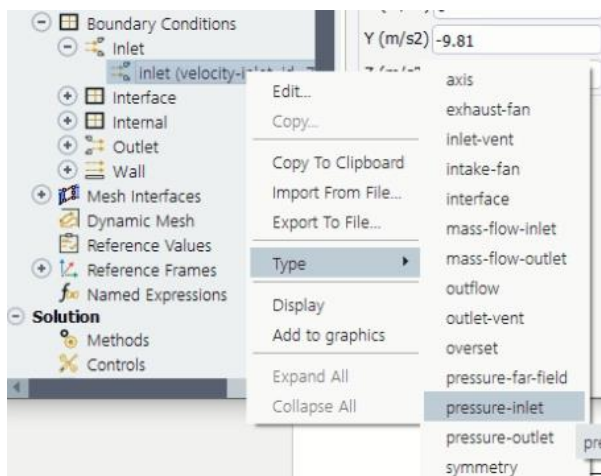


Рис. 13. Boundary Conditions (граничные условия)

-Значением коэффициента шероховатости не задаемся, так как считаем, что стенки гладкие.

- Настраиваем монитор невязок: в разделе мониторы (Monitors) выбираем параметр Residual и в значении Absolute Criteria указываем число 0,0001 для более точного расчета.

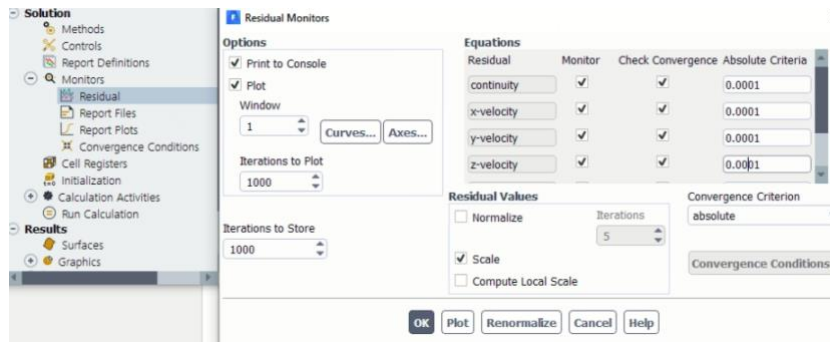


Рис. 14. Раздел мониторы (Monitors)

-Запускаем расчет при помощи вкладки Run Calculation предварительно указав нужное количество итераций (Number of Iteretions)

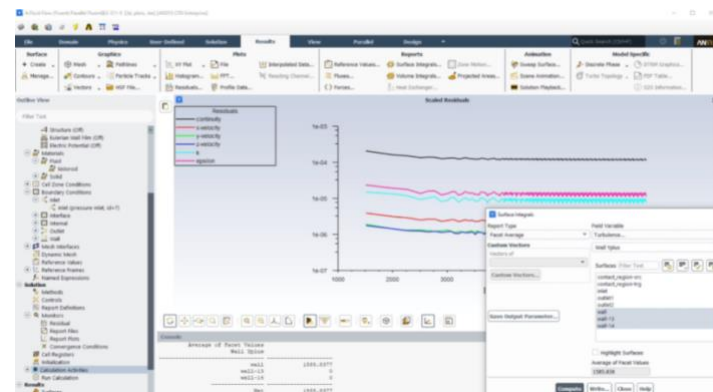


Рис. 15. Запуск расчета

Необходимо следить за величиной Wall Ystar ($Wall\ Ystar < 1$ или > 30 , но < 300): Report(отчет), Surface Integrals (поверхностный интеграл), Report Type (тип отчета), Area Weighted Average(средневзвешенное значение по площади), в разделе Field Variable, Turbulence(турбулентный), Wall Ystar, в Surfaces выбираем wall и нажимаем Compute.

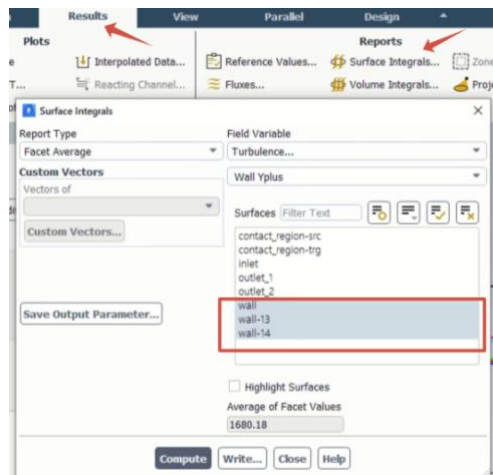


Рис. 16. Раздел Field Variable

При помощи вкладки Surface Integrals в параметре Report type находим Mass-Weighted Average, Field Variable (Velocity), Velocity Magnitude, определяем скорость течения потока.

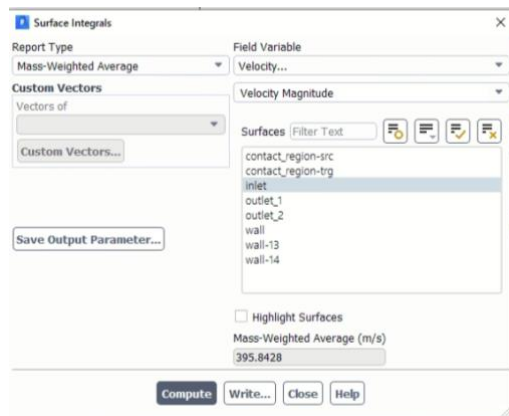


Рис. 17. Раздел Surface Integrals

В этой же вкладке Surface Integrals в параметре Report type находим Mass-Weighted Average, давление (Pressure), Total Pressure, что рассчитывает давление внутри тройника.

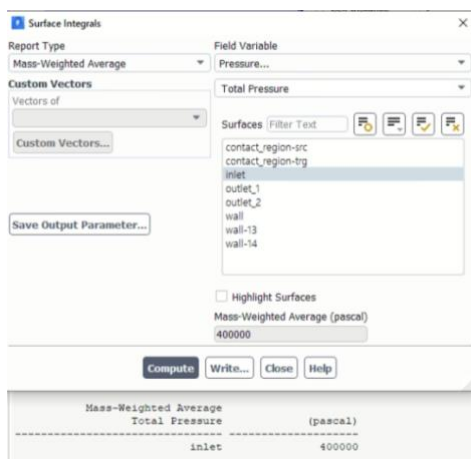


Рис. 18. Настройка параметров для определения давления

Адаптируем сетку по границе: Adapt, Boundary, в разделе Boundary Zones выбираем wall, указываем нужное нам Number Cells (количество ячеек).

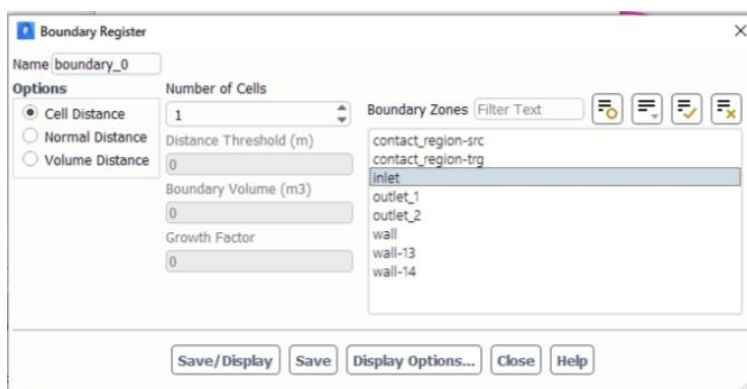


Рис. 19. Раздел Boundary Zones

Далее адаптируем сетку по регионам Region: Adapt (адаптировать), в разделе Region Input Coordinates(входные координаты региона) присваиваем $X_{\max}$ и $Y_{\max}$, нажимаем Mark и Fluent показывает сколько ячеек нужно адаптировать, если нас устраивает эта величина, то нажимаем Adapt. Отправляем задачу на расчет.

Результаты (Results)

Проводим гидродинамическое исследование: выбор оптимального диаметра трубопровода.

Для определения потерь давления от местных сопротивлений используется следующая формула:

$$\Delta P_m = \xi \cdot (\rho \cdot v^2) / 2 \quad (6)$$

где:

ΔP_m — потери давления на местном сопротивлении, Па;
 ξ — коэффициент местного сопротивления (безразмерная величина);
 ρ — плотность кислорода, кг/м³ (при 20 °С $\approx$ 1,331 кг/м³);
 v — скорость потока, м/с.

Скорость потока рассчитывается по формуле:

$$v = 4Q / (\pi \cdot d^2), \quad (7)$$

где:

Q — объёмный расход, м³/с,
 d — внутренний диаметр трубы, м.

Для каждого диаметра трубы рассчитываются:

1. Площадь поперечного сечения: $A = \pi \cdot d^2 / 4$
2. Скорость потока: $v = Q / A$
3. Предполагаемые потери давления: $\Delta P = 0,05 \cdot (p_1 - p_2) = 15\,000$ Па
4. Коэффициент местного сопротивления: $\xi = (2 \cdot \Delta P) / (\rho \cdot v^2)$

Потери давления возникают только в месте разветвления (на тройнике), трубопровод прямой и короткий.

Скорость на входе ≈ 0 — т.е. давление преобразуется полностью в кинетическую энергию двух струй.

Потери от трения в прямом и боковом участках — минимальны, потому основное падение давления обусловлено локальными потерями при разделении потока.

Уравнение Бернулли с учётом потерь:

$$P_1 = P_2 + \frac{\rho \cdot V^2}{2} + \Delta P_{потерь} \quad (8)$$

Исходные данные:

Диаметр трубы: $d = 20$ мм = 0,02 м

Плотность кислорода: $\rho = 5,25 \text{ кг/м}^3$

Вязкость: $\mu = 2,09 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$

Объёмный расход: $Q = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ (поровну делится на два выхода: $0,0005 \text{ м}^3/\text{с}$)

Падение давления: $\Delta P = 15\,000 \text{ Па}$ (предположительно 5% от 0,4 МПа)

Результаты расчёта коэффициентов местного сопротивления для тройников различных диаметров представлены в таблице 3.

Таблица 3

Коэффициенты местного сопротивления тройников

D, мм	A, м ²	v, м/с	ΔP , Па	КМС (расчёт)	КМС [5]	Расхождение, %
15	$1,77 \cdot 10^{-4}$	2,82	15 000	2,08	2,05	+1,5
20	$3,14 \cdot 10^{-4}$	1,59	15 000	2,26	2,20	+2,7
25	$4,91 \cdot 10^{-4}$	1,02	15 000	2,58	2,40	+7,5
32	$8,04 \cdot 10^{-4}$	0,62	15 000	3,72	3,30	+12,7

Анализ результатов показывает, что с увеличением диаметра тройника коэффициент местного сопротивления возрастает. Для тройников диаметром 15–20 мм наблюдается хорошее согласие с справочными данными

(расхождение 1,5–2,7%), для диаметров 25–32 мм расхождение достигает 7,5–12,7%.

Анализ структуры течения

Визуализация полей скорости и давления позволила выявить особенности течения в тройниках различного диаметра.

Для тройников 15–20 мм:

- Формируется компактная зона рециркуляции в месте разветвления
- Длина отрывной зоны составляет $1,5-2D$
- Отсутствие вторичных вихревых структур
- Равномерное распределение потока между выходами (соотношение $\sim 50/50$)

Для тройников 25–32 мм:

- Увеличенная зона отрыва ($3-4D$)
- Формирование вторичных вихрей в угловых областях
- Проявление нестационарности течения
- Неравномерное распределение потока (55/45 для $D=32$ мм)

Обсуждения

Проведенное исследование течения сжатого кислорода через тройники медицинских газовых систем выявило важные закономерности в поведении коэффициентов местного сопротивления (КМС) при изменении геометрических параметров. Полученные результаты демонстрируют рост КМС с увеличением диаметра тройника: от $\xi \approx 2,08$ при 15 мм до $\xi \approx 3,72$ при 32 мм. Эта тенденция объясняется изменением структуры потока при разделении: в элементах меньшего диаметра формируется более организованное течение с меньшими энергетическими потерями.

Интересно провести параллель с исследованиями запыленных воздушных потоков [7], где также отмечается сложная зависимость гидродинамического сопротивления от параметров дисперсной фазы. В работе по валидации течения запыленного воздуха в прямом канале было показано,

что стандартные настройки моделирования (модель турбулентности k-ε с расширенным пристеночным моделированием) обеспечивают адекватное воспроизведение поведения частиц, но требуют дополнительной корректировки для точного определения коэффициента трения. Аналогично, в нашем исследовании использование стандартных параметров модели k-epsilon в Ansys Fluent позволило получить физически корректные поля скоростей и давлений, однако для более точного определения КМС в условиях реальной эксплуатации медицинских систем могут потребоваться уточнения, учитывающие микрогеометрию поверхности и возможные нестационарные эффекты.

Важным аспектом является анализ сеточной зависимости. В исследовании запыленного потока [7] детально изучалось влияние измельчения расчетной сетки на точность определения коэффициента сопротивления. Было установлено, что использование расширенного пристеночного моделирования (EWT) обеспечивает стабильность результатов при изменении параметров сетки. В нашей работе также проводилась адаптация сетки в пристеночной области, что позволило достичь значений Y^+ в рекомендуемом диапазоне и обеспечить достоверность гидродинамических расчетов.

Полученные значения КМС для тройников диаметром 15–20 мм хорошо согласуются с данными [3, 4], что подтверждает корректность разработанной методики моделирования. Для тройников большего диаметра (25–32 мм) расхождения с эмпирическими данными возрастают до 12,7%, что, вероятно, связано с ограничениями стандартной k-ε модели турбулентности при моделировании течений с обширными зонами отрыва и рециркуляции. Применение более совершенных моделей, таких как SST k-ω [11] или методов крупных вихрей (LES), могло бы повысить точность для этих режимов, что определяет направление для дальнейших исследований.

Заключение

В результате проведённого исследования разработана и верифицирована методика численного моделирования течения сжатого медицинского кислорода через тройники различных диаметров с использованием программного комплекса Ansys Fluent. Рассчитаны физико-химические параметры сжатого кислорода при 20 °С и 0,4 МПа: плотность 5,25 кг/м³, динамическая вязкость $2,09 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Установлено, что с увеличением диаметра тройника от 15 до 32 мм коэффициент местного сопротивления возрастает с 2,08 до 3,72. Наилучшее согласие с справочными данными (расхождение 1,5–2,7%) достигнуто для тройников диаметром 15–20 мм. Для крупногабаритных тройников (25–32 мм) расхождение достигает 7,5–12,7%, что связано с неадекватностью стандартных моделей турбулентности для течений с развитыми зонами отрыва.

При увеличении диаметра скорость потока падает, но относительная энергия потерь растёт, из-за чего КМС увеличивается.

Сравнение с результатами исследований других дисперсных сред [2] показывает общность методологических проблем, возникающих при численном моделировании: необходимость тщательного выбора моделей турбулентности, важность адаптации расчетной сетки и валидации результатов на основе экспериментальных данных. Как и в случае с запыленными потоками, где стандартные настройки хорошо описывают траектории частиц, но требуют корректировки для определения сопротивления, при моделировании медицинских газов также необходима дальнейшая работа по уточнению параметров моделей для различных режимов течения и конструктивных особенностей арматуры.

Полученные результаты создают основу для разработки энергоэффективных медицинских газовых систем. В перспективе целесообразно:

1. Провести экспериментальную валидацию численной модели на физических образцах тройников

2. Исследовать влияние шероховатости поверхности и сложной геометрии на КМС
3. Расширить исследования на другие элементы трубопроводной арматуры (отводы, крестовины, задвижки)
4. Разработать методику комплексной оптимизации медицинских газовых систем с учетом гидродинамических и экономических критериев

Литература:

1. Петров И.И., Сидоров А.В., Кузнецова Е.М. Анализ эффективности систем медицинского газоснабжения в лечебных учреждениях // Медицинская техника. 2023. № 4. С. 23–28.
2. Идельчик И.Е., Фрид Е. Гидравлическое сопротивление: справочное руководство для инженеров. М.: Машиностроение, 1989. 424 с.
3. Миллер Д.С. Внутренние потоки: справочник по гидравлическим потерям. М.: Энергоатомиздат, 1990. 420 с.
4. Ферцигер Дж.Х., Перич М. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 2002. 426 с.
5. Ченгель Я.А., Чимбала Дж.М. Гидродинамика: основы и приложения. М.: Техносфера, 2018. 992 с.
6. Зиганшин А.М., Черных В.Л., Логачев К.И., Сарчин Р.Р. Валидация численного решения задачи о течении запыленного воздуха в прямом канале // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. № 2(72). С. 8–20.
7. Уайт Ф.М. Гидравлика. М.: Мир, 2010. 864 с.
8. Иванов В.А., Петров С.С. Численное моделирование течения в тройниковых соединениях трубопроводов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25. № 1. С. 45–56.
9. Смирнов Е.М., Кузьмин А.В. Применение модели турбулентности SST k- ω для моделирования отрывных течений // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 2. С. 78–89.

10. Ментер Ф.Р. Двухпараметрические модели турбулентности для инженерных приложений // Аэрокосмические исследования. 1994. Т. 32. № 8. С. 1598–1605.
11. Zhang Y., Chen X., Li W. CFD analysis of flow characteristics in tee junctions // International Journal of Fluid Mechanics Research. 2023. Vol. 50. No. 3. P. 15–28.
12. Wang L., Liu H. Numerical investigation of pressure losses in pipe fittings // Journal of Fluids Engineering. 2024. Vol. 146. No. 2. P. 021203.
13. Anderson J.D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. N.Y.: McGraw-Hill, 2022. 736 p.
14. Perry R.H., Green D.W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 8th ed. N.Y.: McGraw-Hill, 2007. 2400 p.
15. NIST Chemistry WebBook. Thermophysical properties of fluid systems. Accessed: 24.03.2026.
16. Sutherland W. The viscosity of gases and molecular force // Philosophical Magazine. 1893. Vol. 36. P. 507–531.
17. Инкропера Ф.П., ДеВитт Д.П. Основы тепломассообмена. 6-е изд. М.: Мир, 2007. 997 с.
18. ANSYS Fluent User's Guide. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2019.