

РАСХОДОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОРМИРОВАТЕЛЯ «СТРУЯ»: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ, ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Стариков В.П., Владимирова Н.А.

Краткое содержание

Приведены результаты компьютерного математического моделирования гидродинамических процессов течения жидкости в формирователе «Струя». Теоретические и численные расчеты проведены в программном комплексе ANSYS/CFX в рамках 3-х моделей вязкой жидкой среды (модель однокомпонентной несжимаемой жидкости, модель двухкомпонентной жидкой смеси (раствора) и двухфазная модель жидкости с мелкодисперсными жидкими примесями).

Расчеты, выполненные с целью исследований и анализа расходометрических характеристик устройства «Струя», подтверждают заявленные при проектировании высокие расходометрические свойства формирователя «Струя».

Оборудование и программное обеспечение

Математическое моделирование и гидродинамические расчеты течения однофазных и многофазных вязких жидкостей в формирователе «Струя» проводились в аттестованном лицензионном программном пакете ANSYS/CFX, Ansys Inc.* Построение трехмерной геометрической CAD-модели формирователя в электронном виде, генерация расчетных сеток и создание математической модели формирователя проводилось на персональном компьютере Intel Pentium 4 CPU 2.0 GHz с объемом оперативной памяти 2 GB в операционной среде Windows 2000. Гидродинамические расчеты выполнены на двухядерных персональных компьютерах с CPU 2.16 ГГц и 3.2 ГГц (процессоры Intel® Core™2 Duo и Intel Pentium-D соответственно) с оперативной памятью 2 Гб и 4 Гб, а также на кластерной системе из 6 узлов, соединенных между собой сетевым интерфейсом Gigabit Ethernet. под управлением операционной системы Linux SuSE10.0 x86_64.

I. Моделирование течения однокомпонентной несжимаемой жидкости

В первой части работы содержатся результаты компьютерного математического моделирования гидродинамических процессов течения вязкой жидкости (например, нефти) в формирователе «Струя», проведенного в аттестованном лицензионном программном комплексе ANSYS/CFX в рамках модели гомогенного (однородного) течения однокомпонентной несжимаемой жидкости. Представлены расчетные поля статического и полного давления, скорости, турбулентной кинетической энергии, картины линий тока вдоль тракта формирователя, графики потерь рабочего давления и другие гидродинамические характеристики потока жидкости для ряда значений внешних параметров течения (рабочее давление, скорость, температура) и физических параметров среды (плотность и вязкость жидкости). Расчеты показали, что во всем заданном диапазоне изменения параметров задачи внутри контура формирователя, камеры давления и камер для отбора проб формируется устойчивое стационарное ламинарно-турбулентное течение жидкости с низким уровнем гидравлических потерь по всей

* Лицензия № 408647

длине тракта ($0.06\% \div 0.35\%$ от рабочего давления 75 кГ/см^2), что позволяет с высокой точностью ($0.05\% \div 0.15\%$) определять давление и скорость в ядре потока жидкости в сопле по измерениям давления в камере отбора давления.

1. Геометрическая схема формирователя «Струя», трехмерная математическая модель и расчетные сетки

Двумерная схема формирователя «Струя» представлена на Рис. I-1.

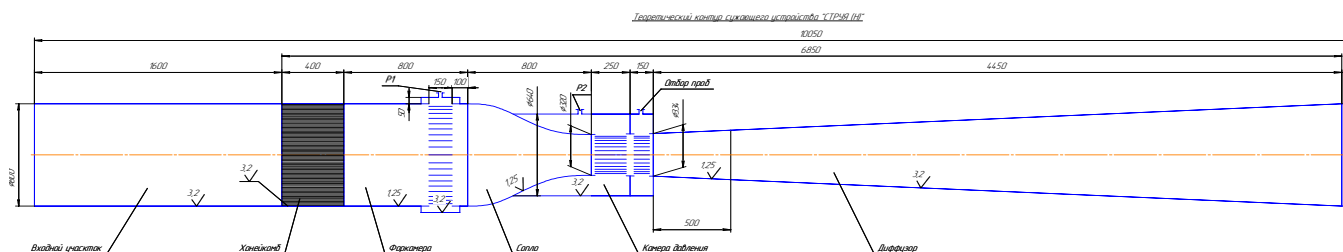


Рис. I-1. Чертеж теоретического контура формирователя «Струя»

На основании двумерного чертежа с учетом всех размеров и геометрических особенностей конструкции (наличие криволинейных поверхностей, отверстий, щелей, перегородок) была разработана электронная трехмерная математическая модель формирователя (Рис. I-2–I-3).

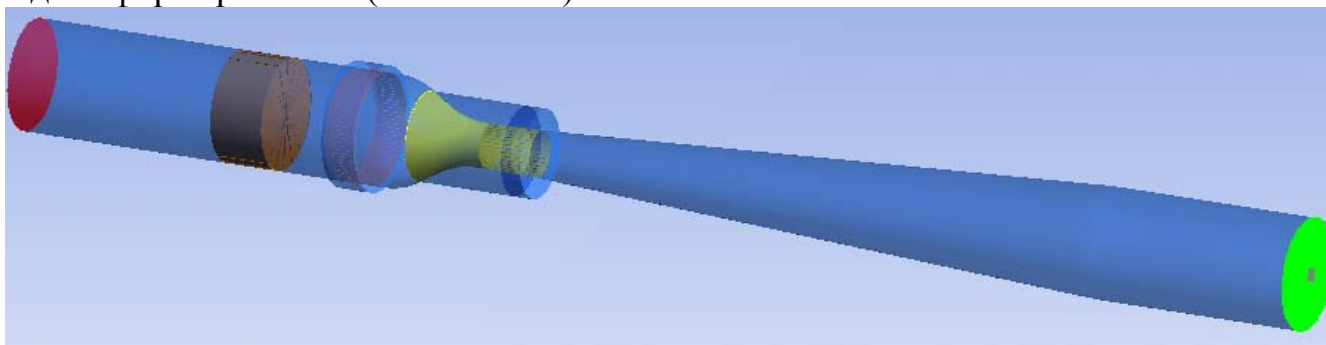


Рис. I-2. CAD-модель формирователя «Струя»

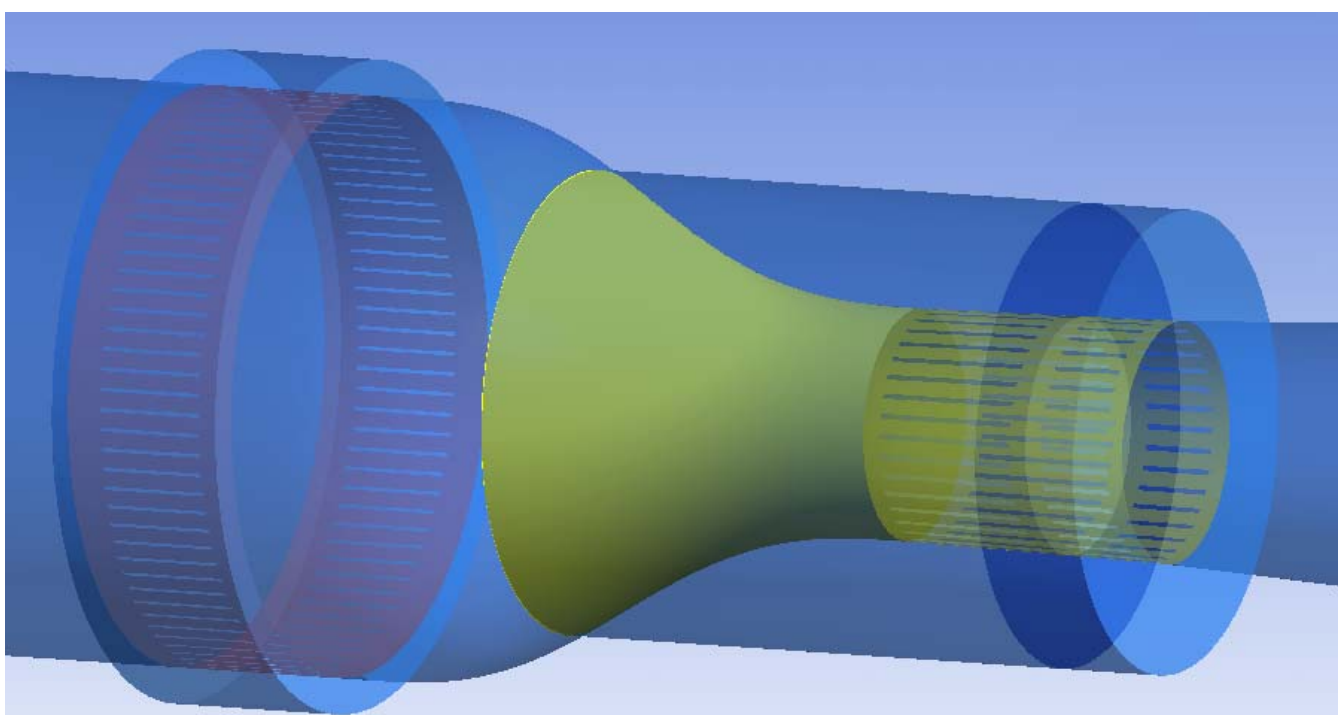


Рис. I-3. Фрагмент 3D CAD-модели формирователя «Струя»

Течение однородной несжимаемой жидкости без учета стратификации в формователе является осесимметричным, поэтому для расчета из полной трехмерной модели был вырезан сектор размером 20° . Внутри расчетного сектора (и, соответственно, на граничных поверхностях) была сгенерирована гексаэдральная пространственная сетка, содержащая 600 тыс. расчетных узлов. Фрагмент расчетной сетки в одной из периодических плоскостей симметрии представлен на Рис. I-4.

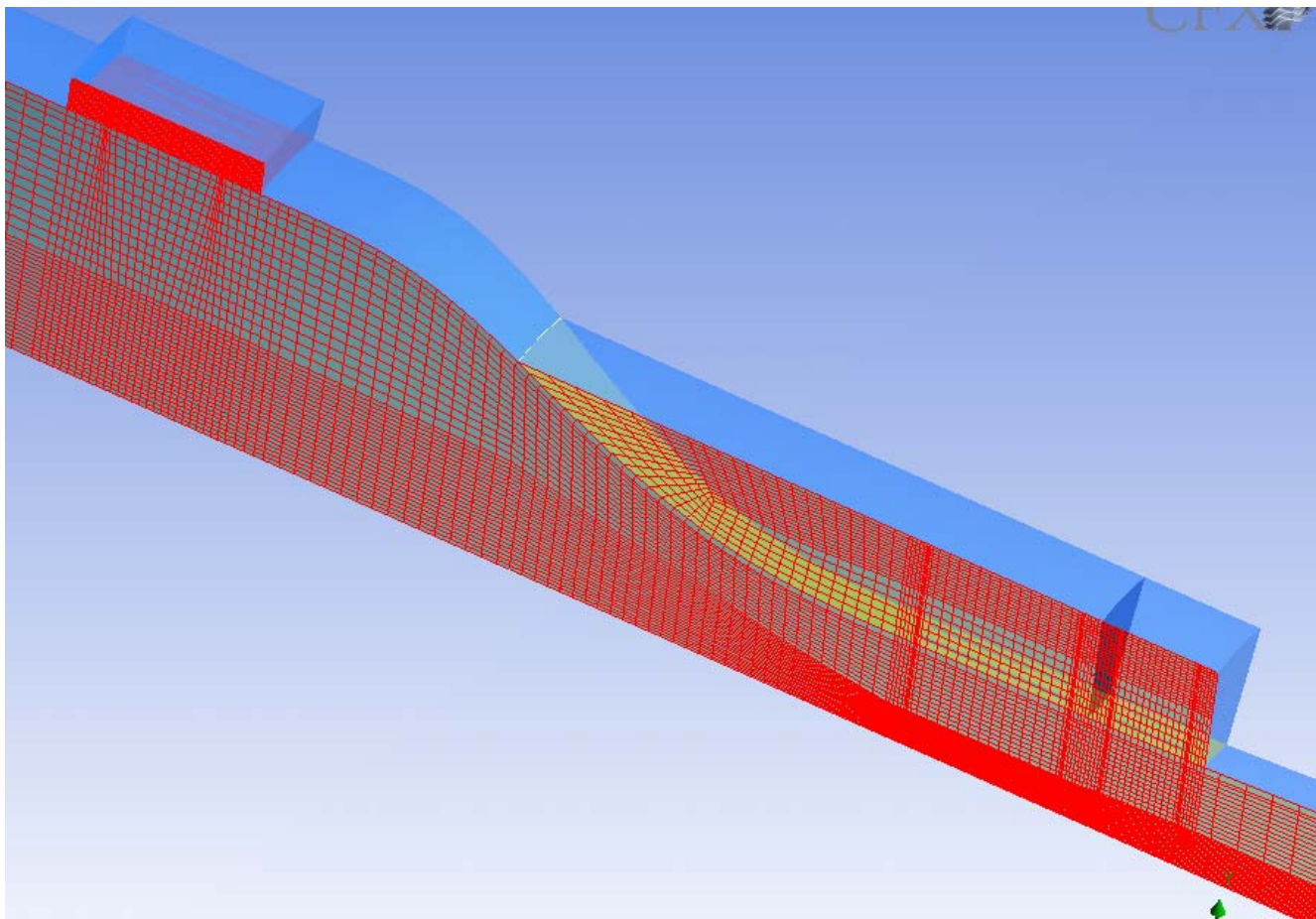


Рис. I-4. Фрагмент расчетной сетки в плоскости симметрии модели

2. Физические свойства жидкости и параметры расчета

Все расчеты выполнены в рамках модели несжимаемой жидкой среды. Жидкость рассматривается как гомогенная однородная однокомпонентная несжимаемая жидкость с определенным набором постоянных дискретных значений основных физических параметров, характеризующих физические свойства жидкости и не зависящих от давления и температуры. В расчеты закладывались следующие значения параметров физических свойств жидкости:

- кинематическая вязкость $\nu=50\div 200$ сСт
- плотность $\rho=800\div 950$ кг/м³
- молярная масса $M=220$ кг/кмоль
- удельная теплоемкость $C_p=1965$ Дж/кг·град
- коэффициент теплопроводности $\lambda=0.134$ Вт/м·град

Значения внешних параметров среды (рабочее давление, скорость потока жидкости, температура) брались для расчетов из следующих дискретных диапазонов:

- рабочее (манометрическое) давление $P_{\text{раб}}=40, 55, 60, 75, 150 \text{ кГ/см}^2$
- скорость $v=1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5 \text{ м/с}$
- температура $T=10, 20, 30, 40, 50 \text{ }^\circ\text{C}$

В соответствии с этими значениями параметров потока жидкости диапазон значений чисел Рейнольдса, рассчитанных для входного диаметра тракта формирователя $D=0.8 \text{ м}$, составляет $Re=4 \cdot 10^3 \div 4 \cdot 10^4$.

Уровень начальной турбулентности потока на входе в формирователь был принят равным 1%.

3. Результаты математического моделирования течения гомогенной однокомпонентной несжимаемой жидкости в формирователе «Струя»

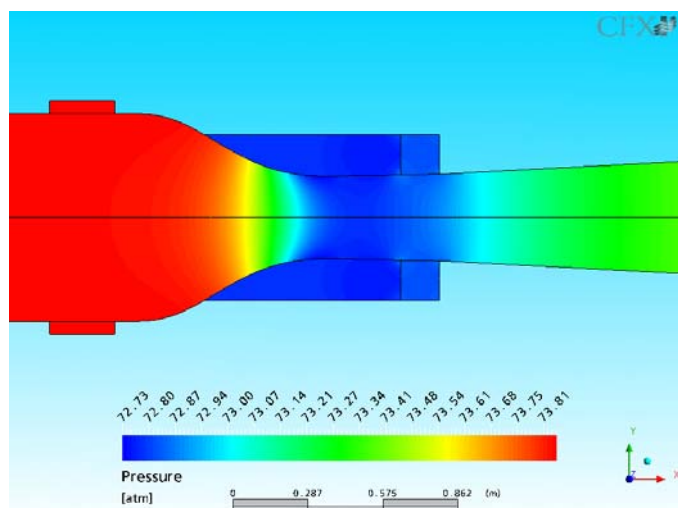
В рамках лицензионного пакета программ ANSYS/CFX численно решались полные, осредненные по Рейнольдсу, уравнения Навье-Стокса, описывающие вязкие ламинарные и турбулентные течения сжимаемых и несжимаемых жидкостей и газов. Расчеты проведены на базе метода конечного объема с использованием численной схемы высокого порядка для конвективных и вязких членов и модели турбулентности SST (Shear-Stress-Transport) $k-\omega$, позволяющей моделировать пристеночный турбулентный пограничный слой и области турбулентного течения с возвратными вихревыми токами и отрывными зонами. Для достижения сходимости и получения установившегося стационарного решения для одного режима (фиксированы все входные и выходные параметры) требовалось осуществить в среднем 100–150 итераций; для расчетной сетки, имеющей около 600 тыс. узлов, это соответствует 5–7 часам работы центрального процессора персонального компьютера класса Pentium 4.

В результате численного моделирования определены различные распределенные и суммарные гидродинамические характеристики (поля статического и полного давления, температуры, скорости, турбулентной кинетической энергии, геометрия линий тока, величины потерь рабочего давления в тракте формирователя и др.).

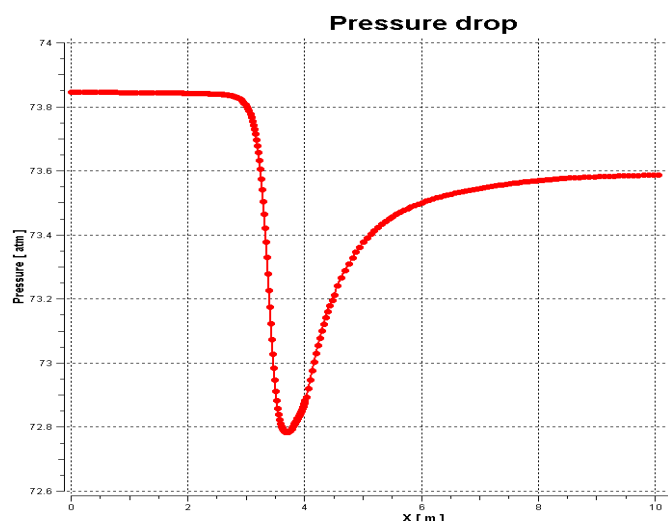
На Рис. I-5–I-9 представлены результаты расчета для 5-ти вариантов параметров рассматриваемой задачи. Жидкость предполагается несжимаемой, вязкой, с дискретным набором постоянных физических свойств, не зависящих от давления и температуры. Уровень рабочего давления, задаваемый в расчетах как граничное условие на выходе из формирователя, не влияет на закономерности распределения давления вдоль тракта формирователя. Все результаты представлены для рабочего манометрического давления $P_{\text{раб}}=75 \text{ кГ/см}^2$. Так как функциональная зависимость кинематической вязкости жидкости от температуры $\nu(T)$ часто неизвестна, то результаты расчетов представлены для двух «крайних» пар значений этих параметров из всего диапазона: $T=50 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\nu=50 \text{ сСт}$; $T=10 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\nu=200 \text{ сСт}$ (вязкость жидкости уменьшается с ростом температуры). Плотность несжимаемой жидкости является постоянной величиной и задавалась в расчетах двумя значениями – средней $\rho=875 \text{ кг/м}^3$ и максимальной по ГОСТу $\rho=950 \text{ кг/м}^3$. Скорость течения жидкости на входе в формирователь задавалась равной $v=1 \text{ м/с}$ для моделирования течения при низких числах Рейнольдса порядка $Re=4000$ и равной $v=2.5 \text{ м/с}$ для моделирования чисел Рейнольдса в диапазоне $Re=10^4 \div 4 \cdot 10^4$. Таким образом, представленные на Рис. I-5–I-9 результаты расчетов охватывают весь исследуемый диапазон изменения параметров задачи и дают полный объем

информации об особенностях и характеристиках течения. Хонейкомб, расположенный перед соплом формирователя для выравнивания поля скоростей входящего потока жидкости, моделировался участком виртуального «пористого» материала с заданными потерями давления жидкости в нем в виде зависимости $dP/dx = -K \cdot \rho \cdot v^2 / 2$, где коэффициент потерь K принимался равным $K = 0.07 - 1.0 \text{ м}^{-1}$ в диапазоне кинематической вязкости $\nu = 50 - 200 \text{ сСт}$.

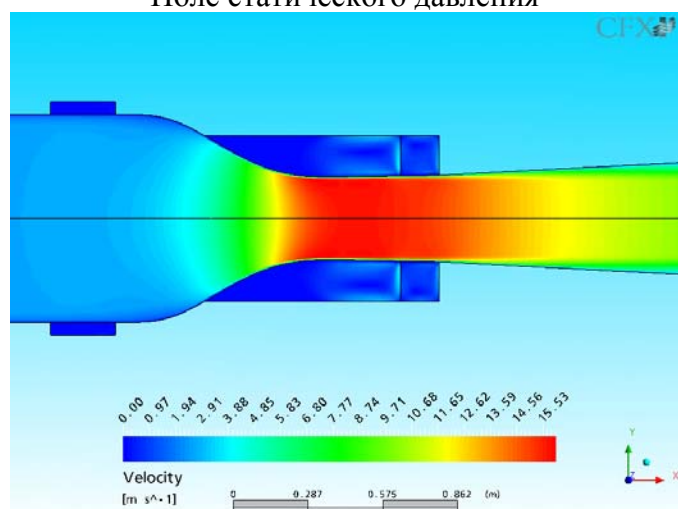
Вязкость $\nu = 50 \text{ сСт}$, $K = 0.07 \text{ м}^{-1}$, плотность $\rho = 875 \text{ кг/м}^3$, температура $T = 50^\circ\text{C}$, скорость $v = 2.5 \text{ м/с}$



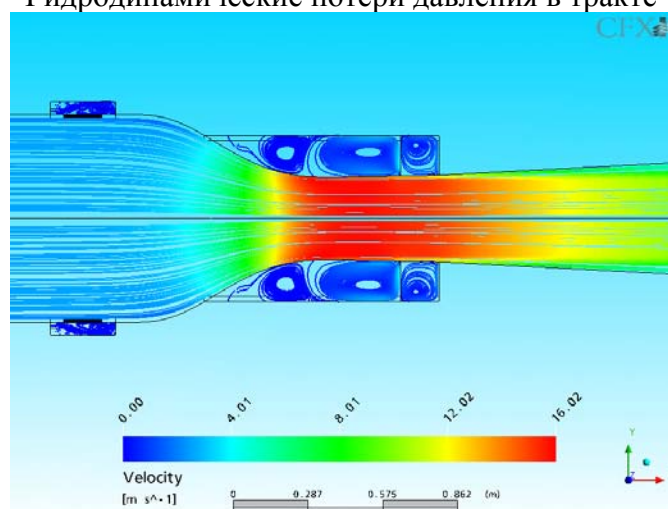
Поле статического давления



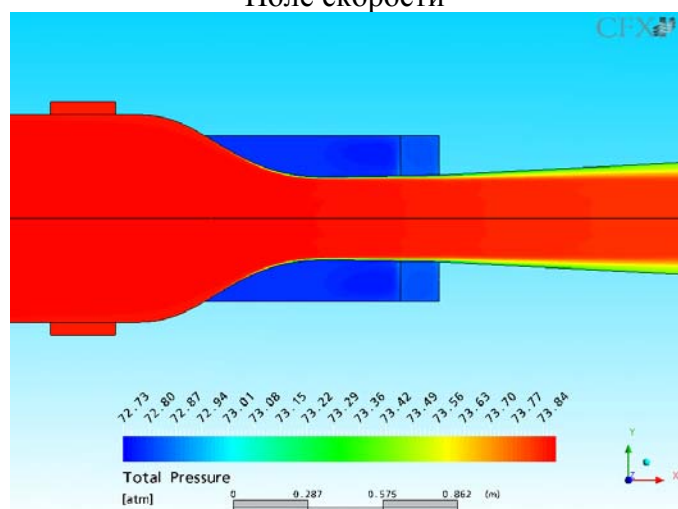
Гидродинамические потери давления в тракте



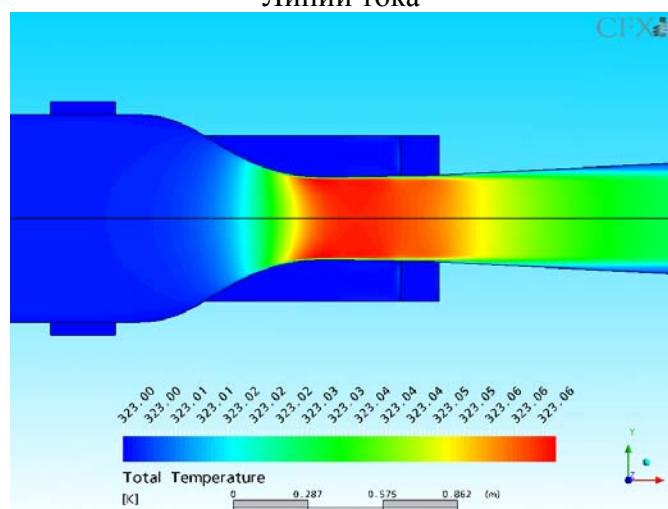
Поле скорости



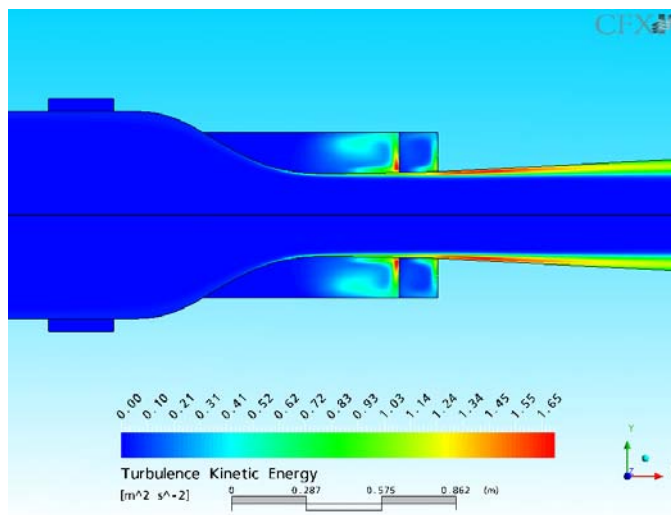
Линии тока



Поле полного давления



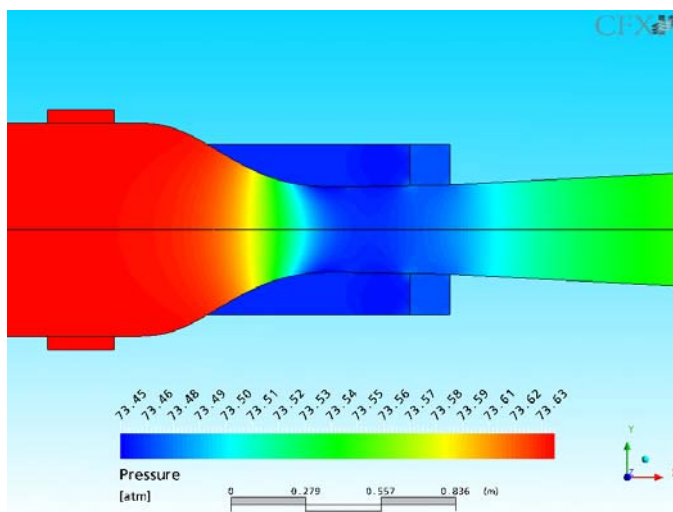
Поле полной температуры



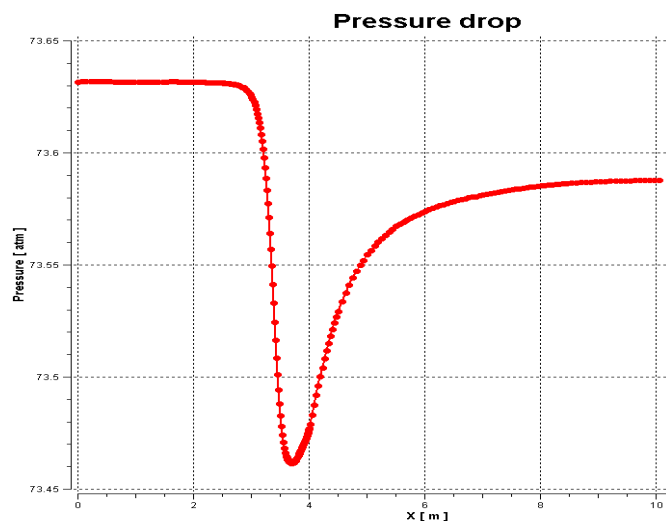
Поле турбулентной кинетической энергии

Рис. I-5

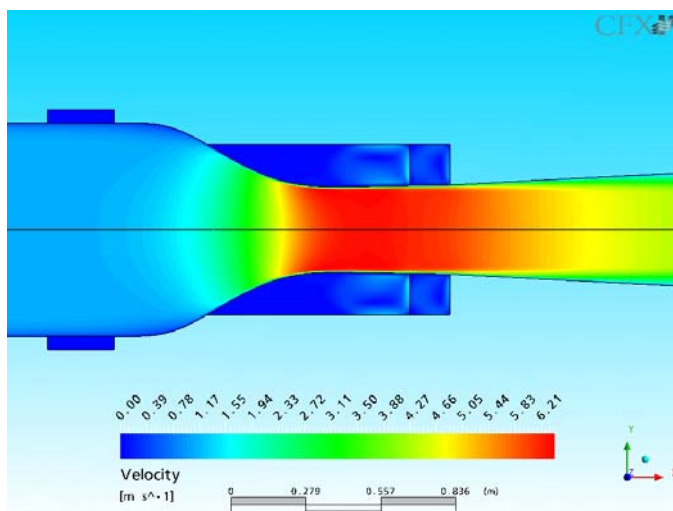
Вязкость $\nu=50$ сСт, $K=0.07\text{м}^{-1}$, плотность $\rho=875$ кг/м³, температура $T=50^\circ\text{C}$, скорость $v=1.0$ м/с



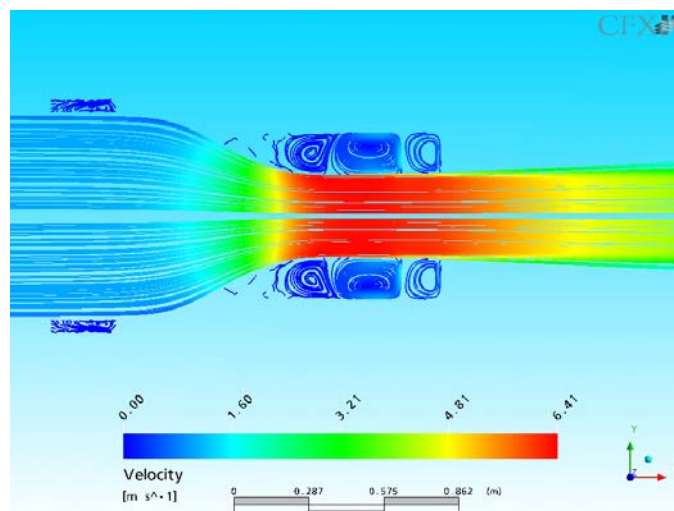
Поле статического давления



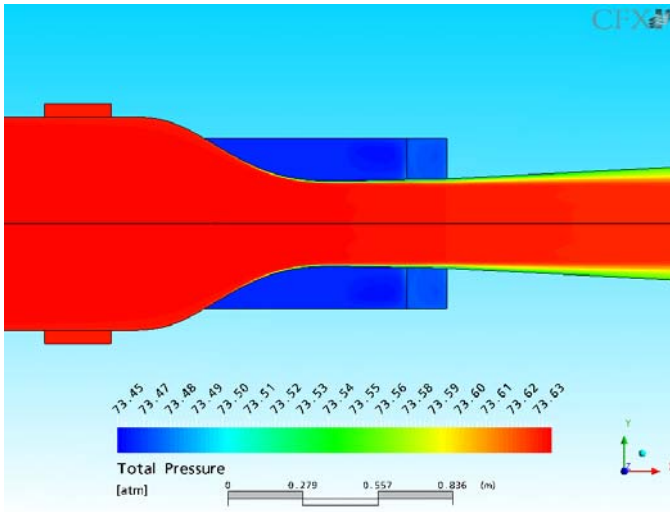
Гидродинамические потери давления в тракте



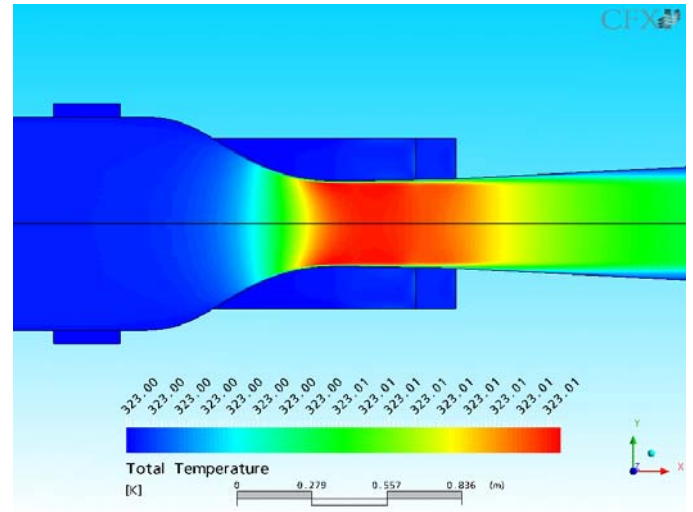
Поле скорости



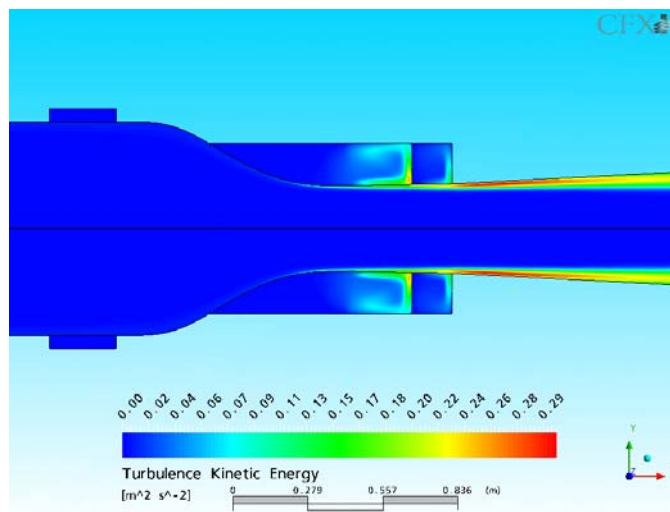
Линии тока



Поле полного давления



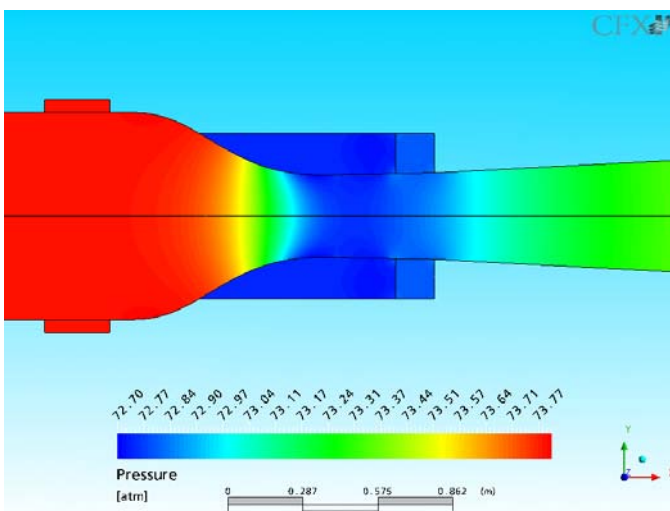
Поле полной температуры



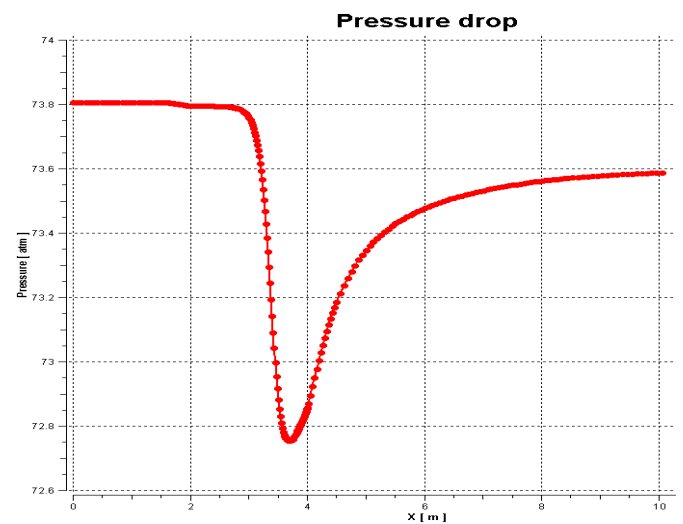
Поле турбулентной кинетической энергии

Рис. I-6

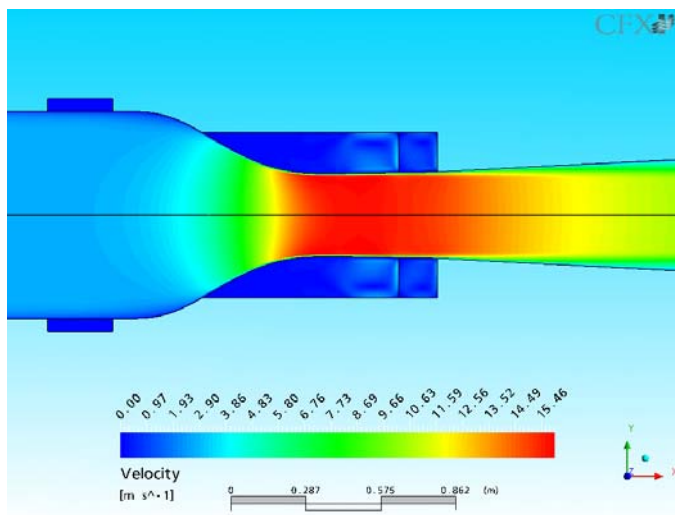
Вязкость $\nu=200$ сСт, $K=1.0\text{м}^{-1}$, плотность $\rho=875$ кг/м³, температура $T=10^\circ\text{C}$, скорость $v=2.5\text{м/с}$



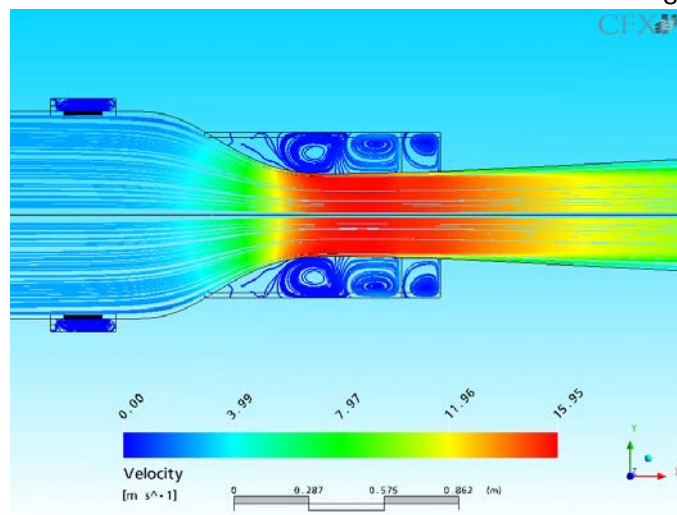
Поле статического давления



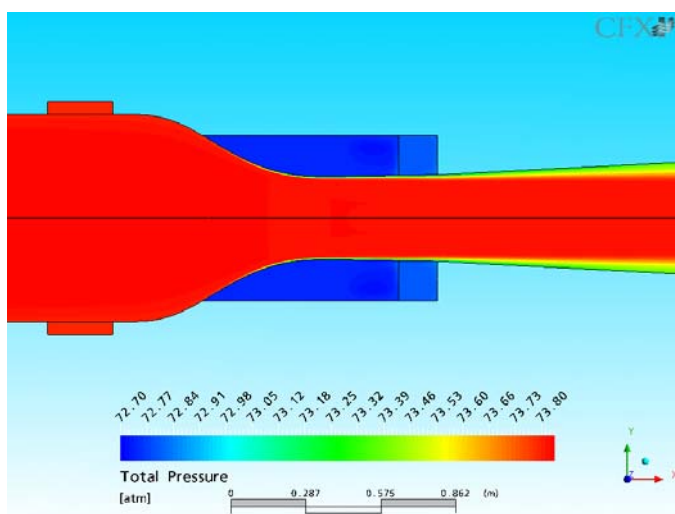
Гидродинамические потери давления в тракте



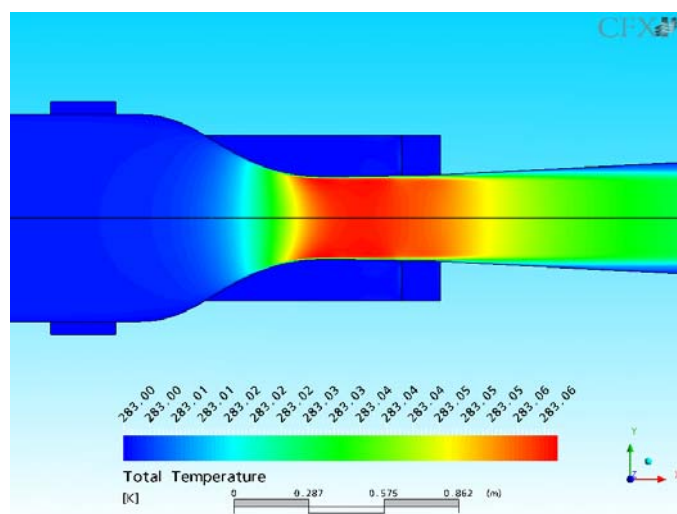
Поле скорости



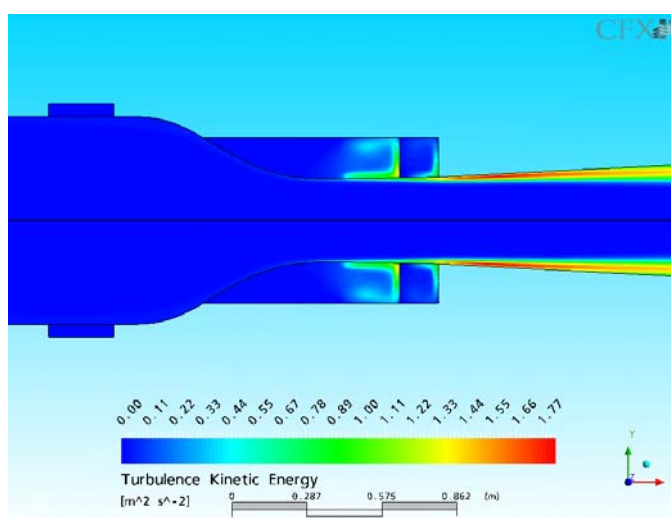
Линии тока



Поле полного давления



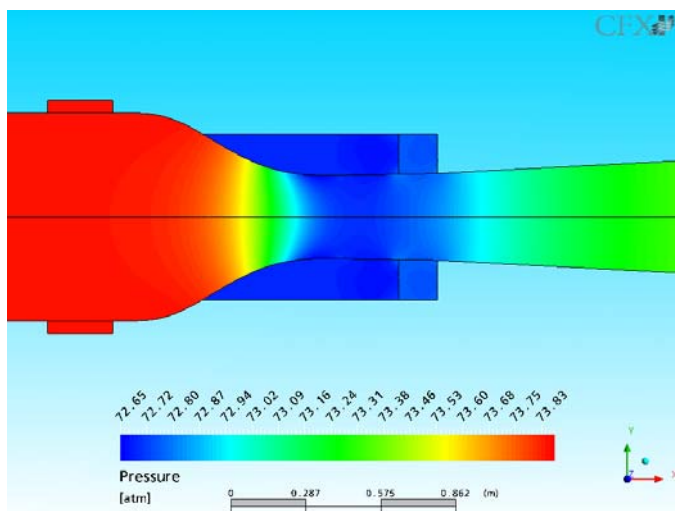
Поле полной температуры



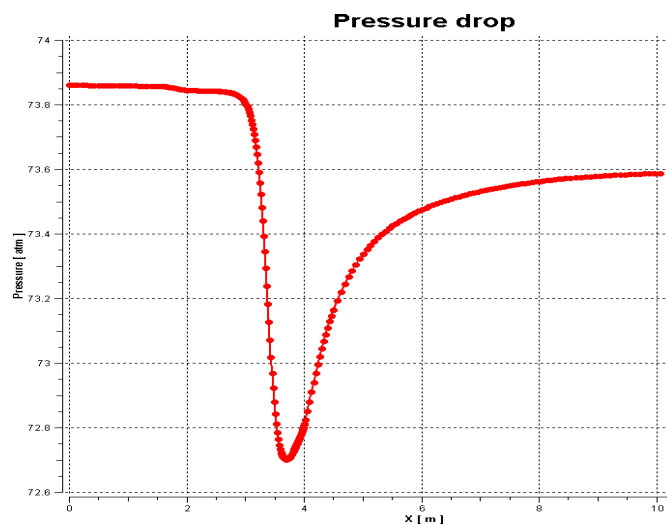
Поле турбулентной кинетической энергии

Рис. I-7

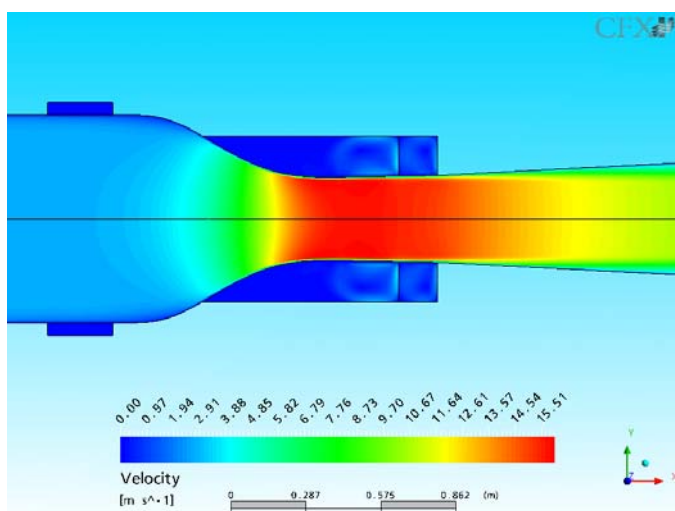
Вязкость $\nu=200$ сСт, $K=1.0\text{м}^{-1}$, плотность $\rho=950$ кг/м³, температура $T=10^\circ\text{C}$, скорость $v=2.5$ м/с



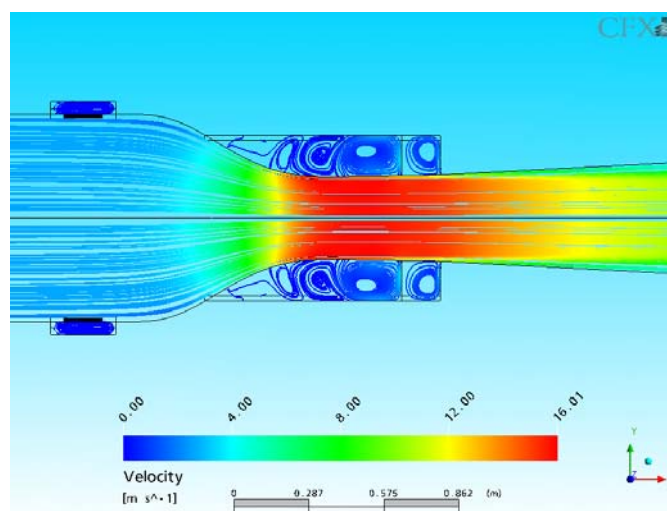
Поле статического давления



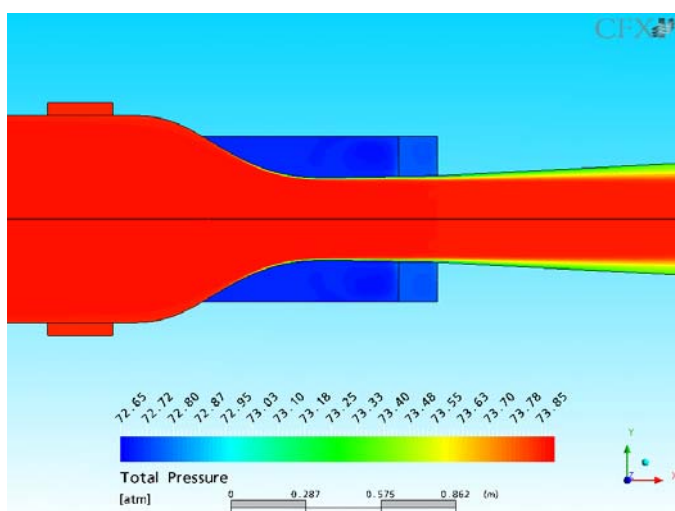
Гидродинамические потери давления в тракте



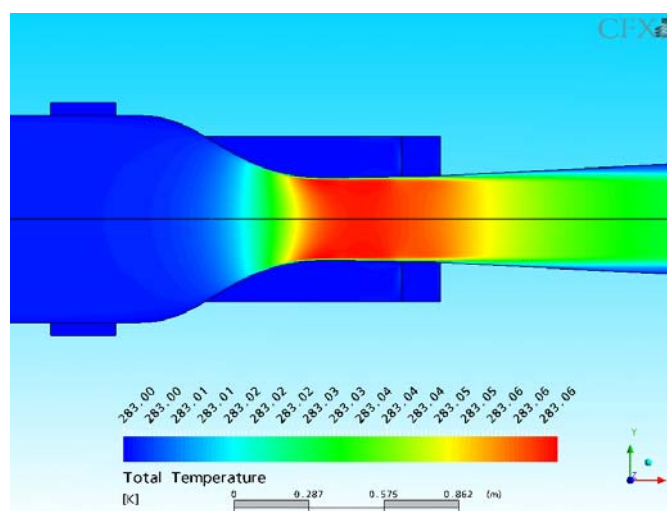
Поле скорости



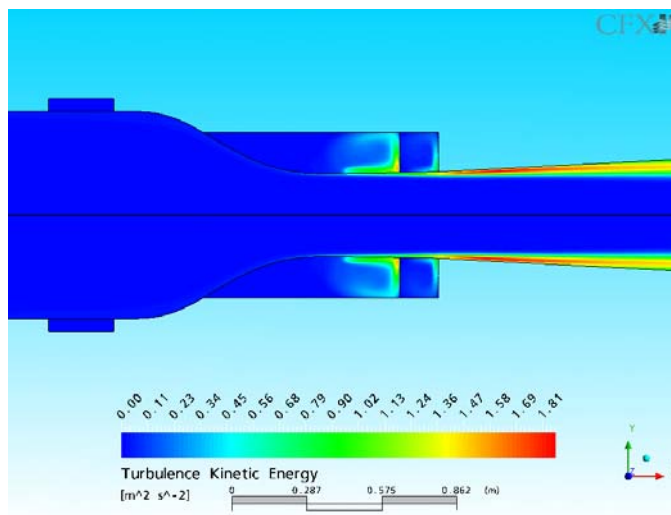
Линии тока



Поле полного давления



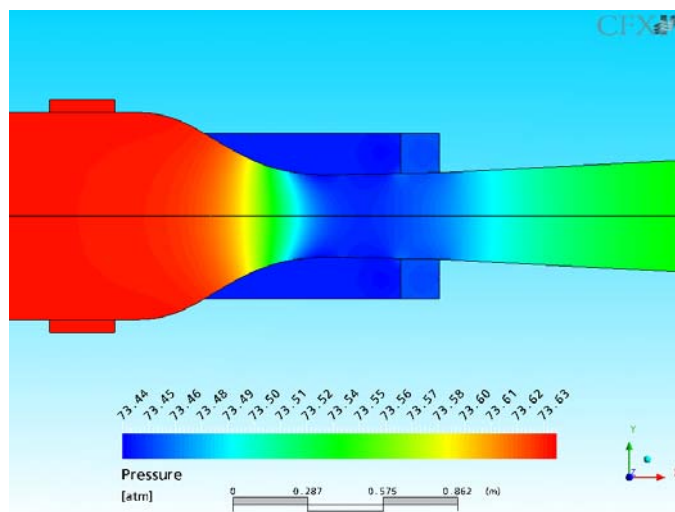
Поле полной температуры



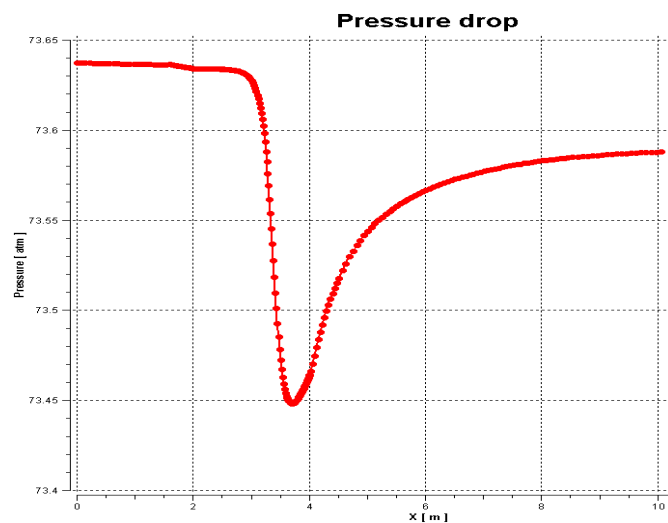
Поле турбулентной кинетической энергии

Рис. I-8

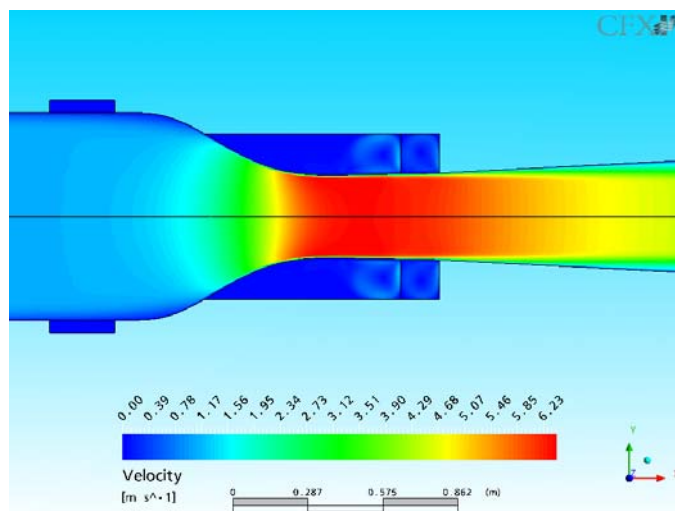
Вязкость $\nu=200$ сСт, $K=1.0\text{м}^{-1}$, плотность $\rho=950$ кг/м³, температура $T=10^\circ\text{C}$, скорость $v=1.0$ м/с



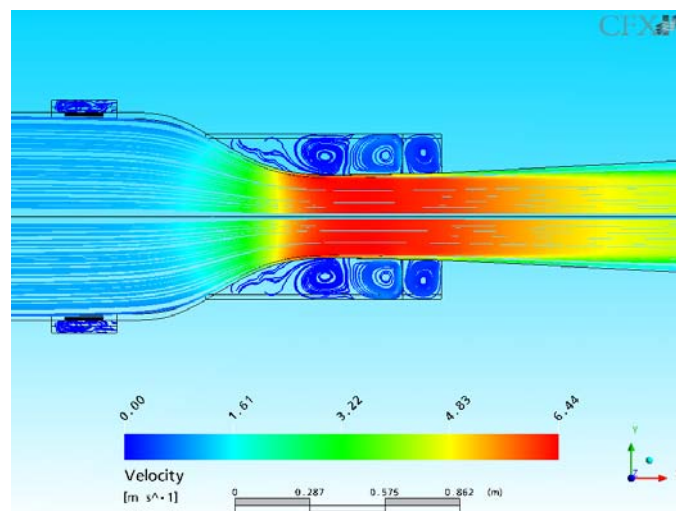
Поле статического давления



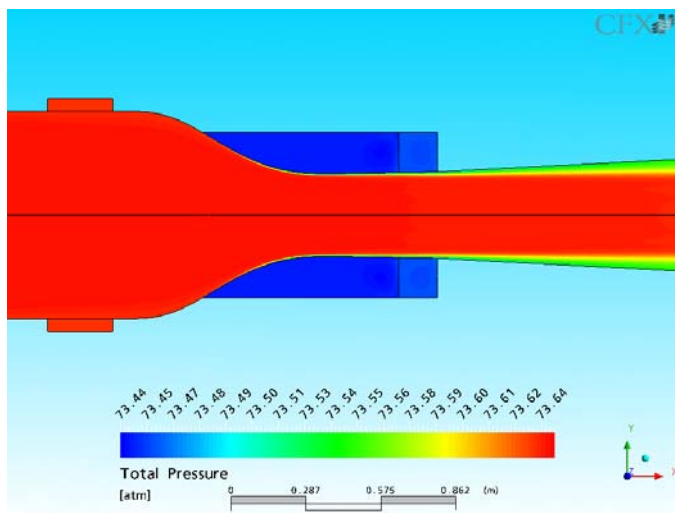
Гидродинамические потери давления в тракте



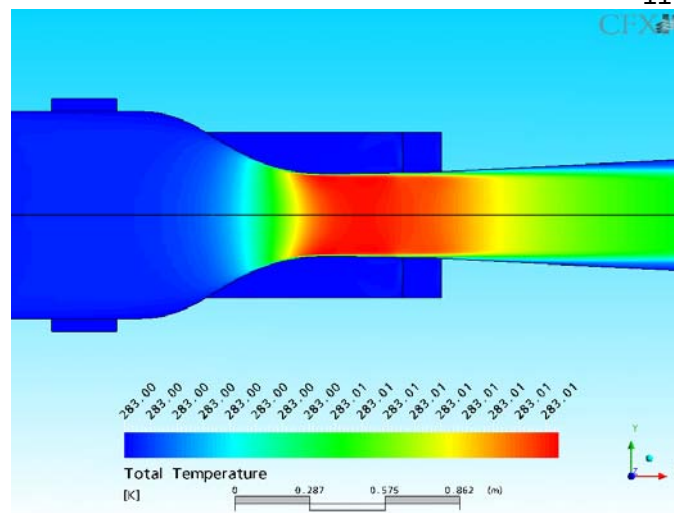
Поле скорости



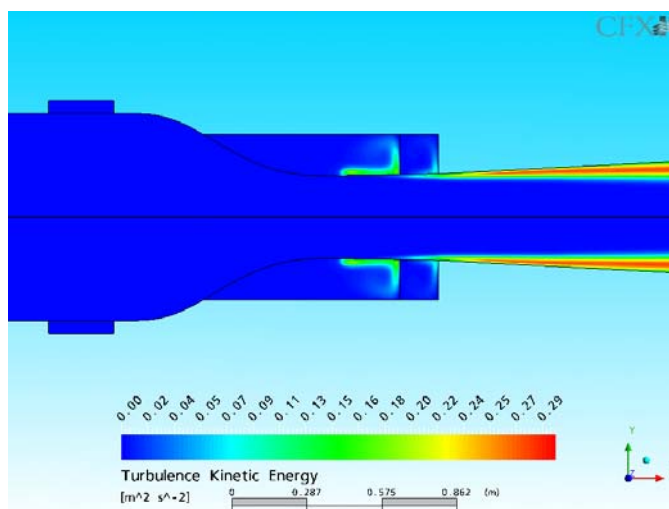
Линии тока



Поле полного давления



Поле полной температуры



Поле турбулентной кинетической энергии

Рис. I-9

Расчеты показали, что во всем заданном диапазоне изменения параметров задачи внутри контура формователя, камеры давления и камер для отбора проб формируется устойчивое стационарное ламинарно-турбулентное течение жидкости с низким уровнем гидравлических потерь по всей длине тракта ($0.06\% \div 0.35\%$ от рабочего давления 75 кГ/см^2), что позволяет с высокой точностью ($0.05\% \div 0.15\%$) определять давление и скорость в ядре потока жидкости в сопле по измерениям давления в камере отбора давления.

II. Моделирование течения двухкомпонентной жидкой смеси (раствора)

Во второй части работы представлены результаты компьютерного моделирования влияния различного характера профиля скорости на входе в формователь на процессы формирования, перемешивания и выравнивания потока вязкой жидкости в сопле и в диффузоре с целью последующего измерения давления в камере давления и анализа состава потока в камере отбора проб. Проведен анализ 5-ти вариантов функциональной зависимости профиля скорости на входе, от равномерного потока до сильно неравномерного вдоль входного диаметра потока. Для моделирования «жесткой неравномерности» рассмотрен случай поворотного на 90° колена, профиль скорости для которого взят из работы [3]. В качестве рабочей

среды рассмотрена гомогенная жидкая смесь (раствор) основной жидкости (98.5%) и жидкой примеси, например, воды (1.5%). Представлены картины линий тока, профили скорости в различных сечениях сопла и диффузора, распределение гидродинамических потерь вдоль тракта формирователя.

1. Трехмерная математическая модель и расчетные сетки

Разработана электронная трехмерная математическая CAD-модель формирователя «Струя-Н-800» общей длиной 10.05 м (Рис. II-1 – II-2).

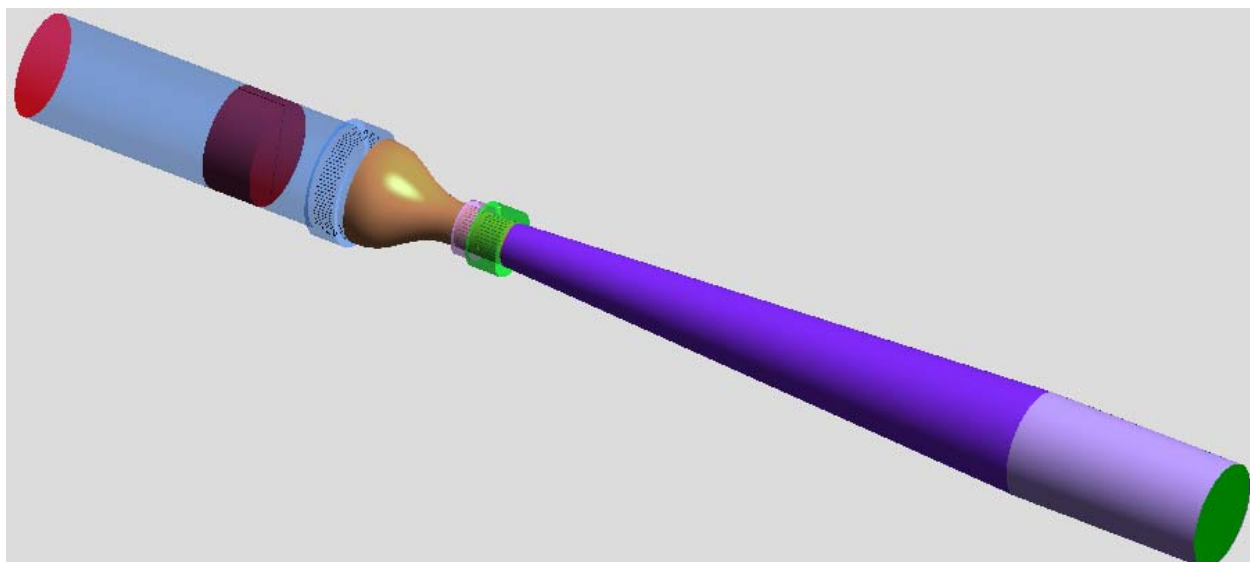


Рис. II-1. CAD-модель формирователя «Струя»

(красное - входное сечение, голубой цвет – начальный участок, бордовый – хонейкомб, бежевый – сопло, розовый – камера давления, салатовый – камера отбора проб, фиолетовый – диффузор, сиреневый – выходной участок, зеленое – выходное сечение)

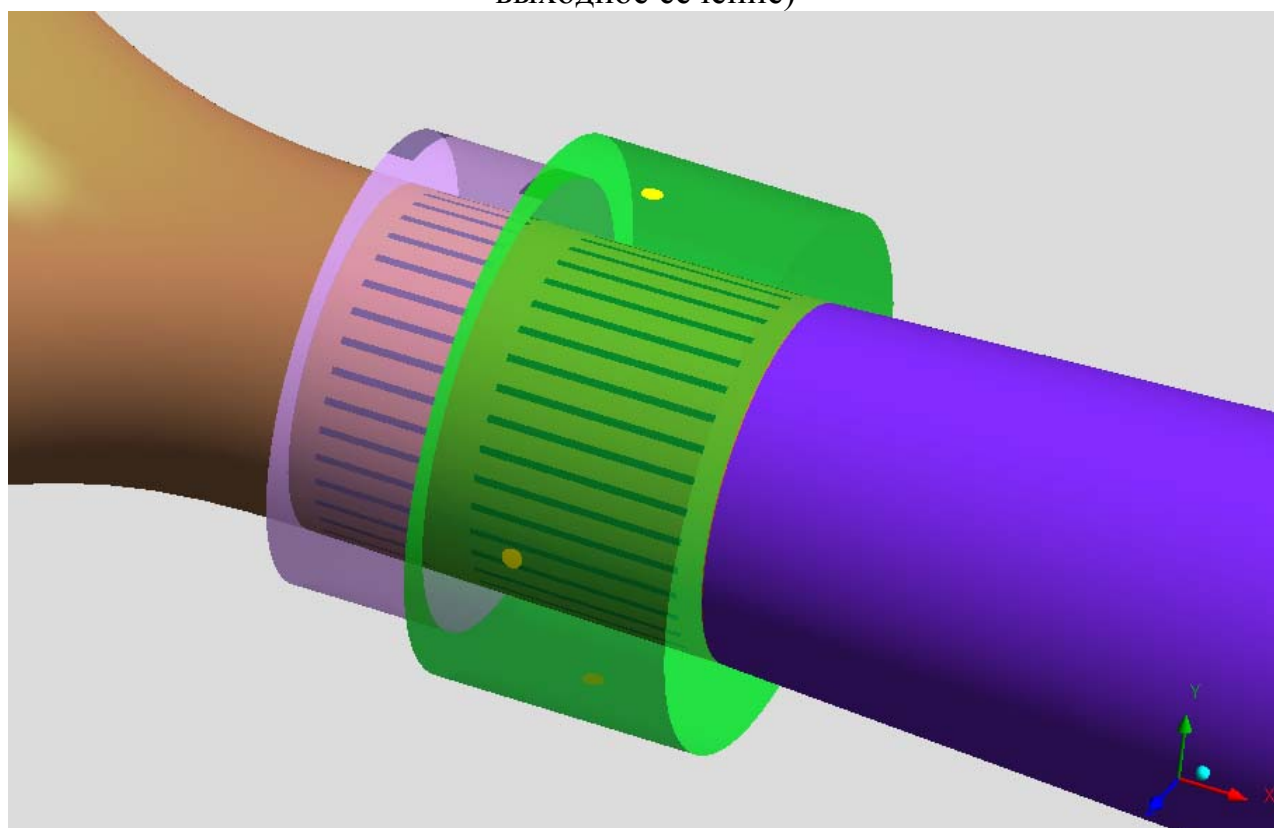


Рис. II-2. Фрагмент 3D модели (желтые кружки – отверстия для отбора проб)

Течение жидкости в формирователе с учетом стратификации жидкой среды в гравитационном поле Земли имеет вертикальную плоскость симметрии, поэтому для расчета использована половина полной трехмерной модели, т.е. сектор размером 180° .

В расчетной области внутри теоретического контура формирователя и на его границах была сгенерирована гексаэдральная пространственная сетка, содержащая 1 млн. узлов. Фрагменты расчетной сетки в вертикальной плоскости симметрии и в окрестности отверстия для отбора проб представлены на Рис. II-3 – II-4.

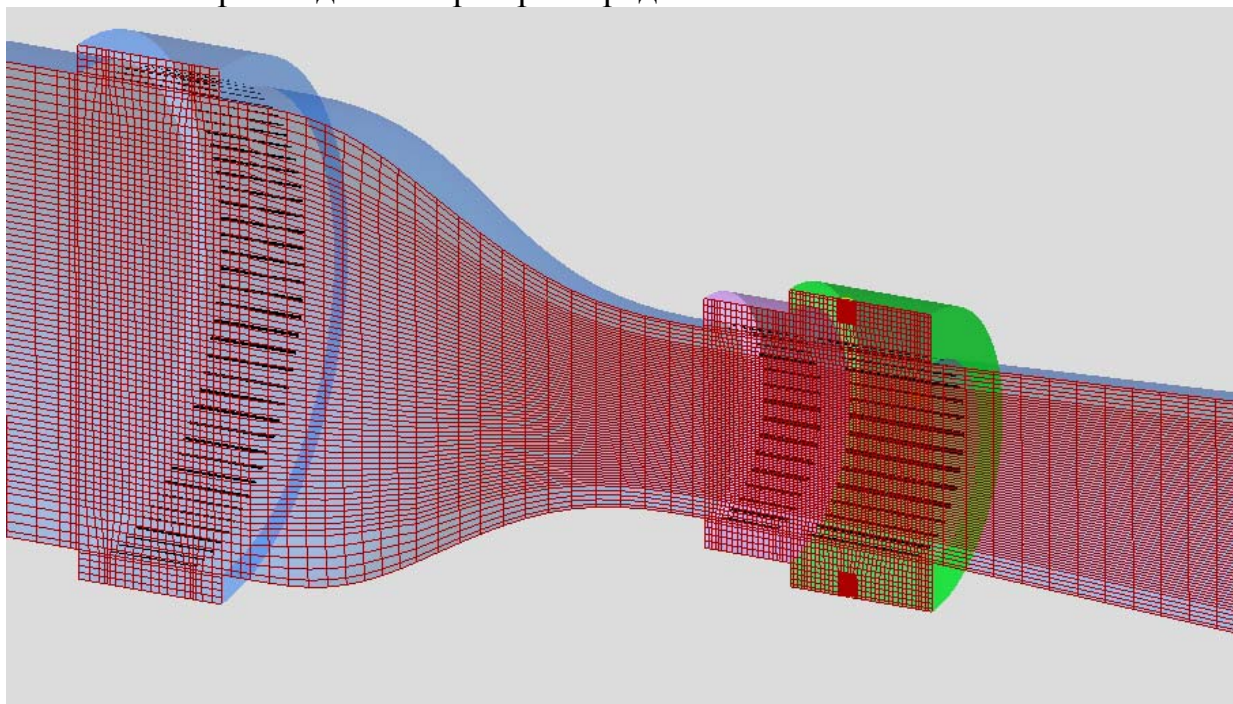


Рис. II-3. Фрагмент расчетной сетки в вертикальной плоскости симметрии

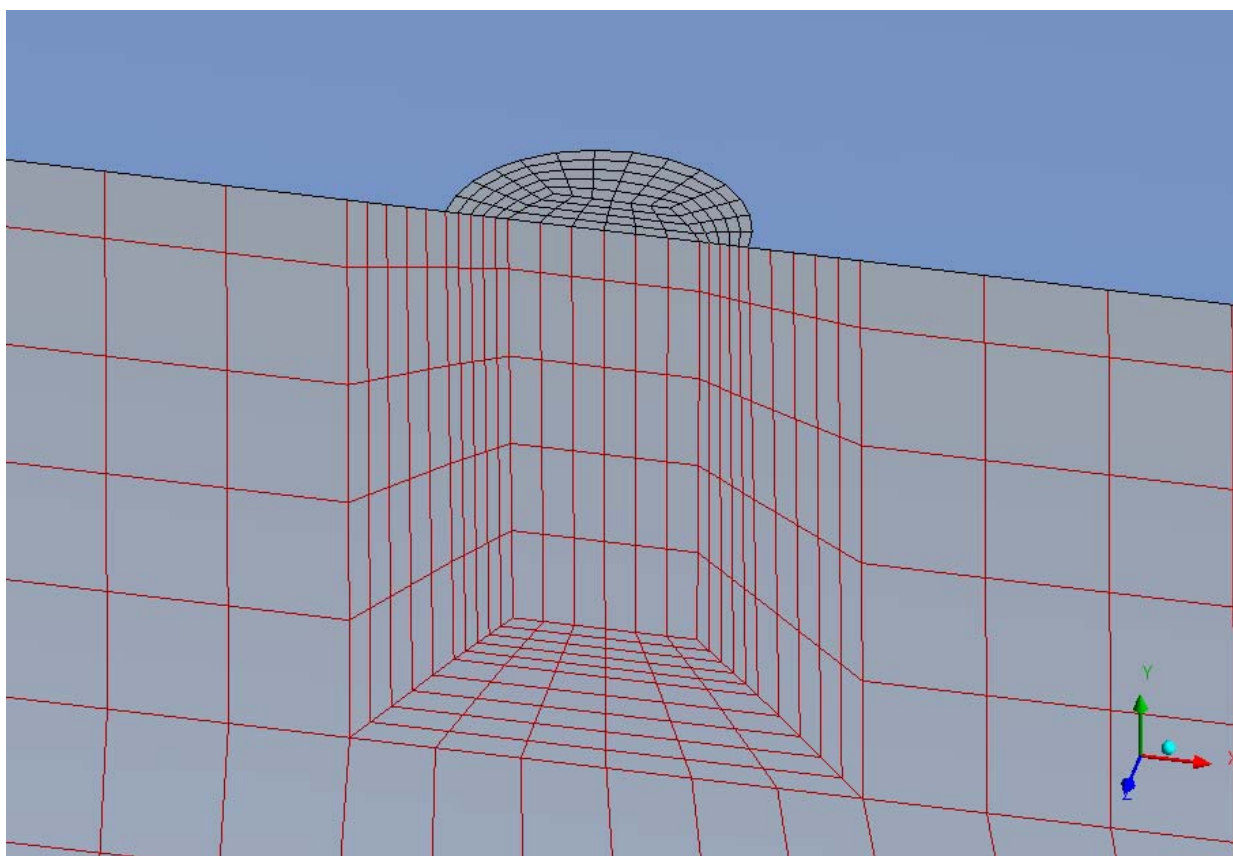


Рис. II-4. Фрагмент расчетной сетки в окрестности отверстия для отбора проб

1. Физические свойства двухкомпонентной жидкой смеси (раствора) и параметры расчетов

В качестве рабочей среды рассмотрена двухкомпонентная жидкая смесь (раствор) основной жидкости, например, нефти (98.5%) и жидкой примеси, например, воды с растворенными в ней солями (1.5%).

В расчеты закладывались следующие средние значения физических параметров:

для основной компоненты двухкомпонентного раствора

- кинематическая вязкость $\nu=50\div 200$ сСт
- плотность $\rho=800\div 950$ кг/м³
- молярная масса $M=220$ кг/кмоль
- удельная теплоемкость $C_p=1965$ Дж/кг·град
- коэффициент теплопроводности $\lambda=0.134$ Вт/м·град;

для компоненты жидкой примеси (вода)

- динамическая вязкость $\mu=0.0008899$ кг/мс
- плотность $\rho=1005$ кг/м³
- молярная масса $M=18.02$ кг/кмоль
- удельная теплоемкость $C_p=4181.7$ Дж/кг·град
- коэффициент теплопроводности $\lambda=0.6069$ Вт/м·град.

Значения внешних параметров среды (рабочее давление, скорость потока, температура) брались для параметрических расчетов из рядов:

- рабочее (манометрическое) давление $P_{\text{раб}}=40, 55, 60, 75, 150$ кГ/см²
- скорость потока на входе в формирователь $\nu=1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5$ м/с
- скорость отсоса в камере отбора проб $\nu_{\text{пробы}}=1$ м/с
- температура $T=10, 20, 30, 40, 50$ °С.

В соответствии с этими значениями параметров потока диапазон значений чисел Рейнольдса, рассчитанных для входного диаметра формирователя $D=0.8$ м, составляет $Re=4\cdot 10^3 \div 4\cdot 10^4$.

Уровень начальной турбулентности потока на входе в формирователь был принят равным 1%.

В модели многокомпонентной смеси жидких компонентов (Ideal Mixture – гомогенный жидкий раствор) заложен массовый перенос компонентов за счет конвекции и диффузии, и уравнение энергии содержит дополнительный член переноса энтальпии движущимися и перемешивающимися компонентами. В такой модели перемешивание осуществляется на молекулярном уровне и скорость перемешивания (диффузии) компонент смеси подчиняется закону Фика (Fick). В модели идеальной жидкой смеси физические параметры смеси (плотность, вязкость и т.в.) определяются как взвешенное среднее от параметров компонентов с учетом их массовых долей. Все компоненты смеси имеют одинаковые поля скорости, давления и температуры (т.е. представляют однородную гомогенную жидкую среду). Сумма массовых долей всех компонентов в каждой точке течения в любой момент времени постоянна и равна 1.

3. Результаты численного моделирования влияния формы входного профиля скорости на равномерность потока в формирователе «Струя»

Компьютерное моделирование проводилось на базе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, описывающих вязкие ламинарно-турбулентные течения жидкостей и газов. Все расчеты выполнены в рамках модели несжимаемой жидкой среды. Использовалась численная схема высокого порядка для конвективных и вязких членов и модель турбулентности SST (Shear-Stress-Transport) $k-\omega$, позволяющая моделировать пристеночный пограничный слой и области турбулентного течения с возвратными вихревыми токами и отрывными зонами. Для получения установившегося стационарного решения для каждого режима течения требовалось осуществить 150–200 итераций; для расчетной сетки, состоящей из 1 млн. узлов, это соответствовало 7-10 часам работы компьютеров.

Проведено численное исследование влияния различного характера входного профиля скорости на процессы формирования, перемешивания и выравнивания потока в сопле для последующего измерения давления в камере давления и анализа состава жидкости в камере отбора проб. Проведен анализ 5-ти вариантов функциональной зависимости профиля скорости во входном сечении, от равномерного (симметричного) до несимметричного, сильно неравномерного потока. В качестве рабочей среды рассмотрена жидкая смесь (раствор) основной жидкости, например, нефти (98.5%) и жидкой примеси, например, воды (1.5%). Для моделирования «жесткой» неравномерности рассмотрен случай поворотного на 90° колена, профиль скорости для которого можно найти в работе [3]:

$$w/w_0 = 0.585 + 1.64 \cdot \sin(0.2 + 1.95 \cdot (2y/b_0)), \quad (1)$$

где w_0 – средняя по сечению скорость, b_0 – ширина канала, $-b_0/2 \leq y \leq b_0/2$ – координата по высоте канала. Следует отметить, что данная формула является аппроксимацией экспериментальных данных для плоских прямых колен. Мы решаем пространственную задачу, а формирователь имеет осевую симметрию. Поэтому данная функциональная зависимость для входного профиля скорости применялась в вертикальном меридиональном сечении, а для аппроксимации профиля скорости в горизонтальном направлении использовался степенной закон для трубы круглого сечения:

$$w/w_{max} = (1 - z/R_0)^{1/m}, \quad m \geq 1, \quad (2)$$

где w_{max} – максимальная скорость в сечении, R_0 – радиус трубы, m – показатель степени (в расчетах принимался равным 7), z – координата в поперечном направлении.

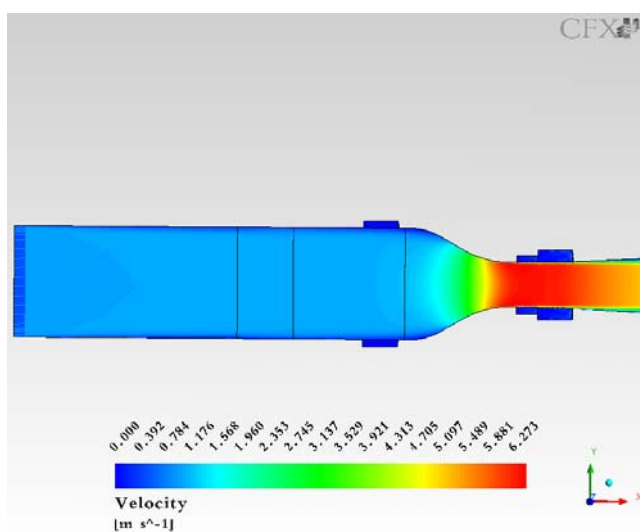
Исследовано 4 различных видов профиля скорости на входе в формирователь «Струя»:

1. Равномерный профиль, $w = w_0 = 1$ м/с
2. «Жесткая» неравномерность, формула (1), $w_{min} = -1.1$ м/с, $w_{max} = 2.2$ м/с (на входе большая зона возвратного течения)
3. «Мягкая» неравномерность, модифицированная формула (1), $w_{min} = -0.1$ м/с, $w_{max} = 3.2$ м/с (область возвратного течения близка к нулю)
4. Средняя неравномерность, модифицированная формула (1), $w_{min} = 1$ м/с, $w_{max} = 2.5$ м/с

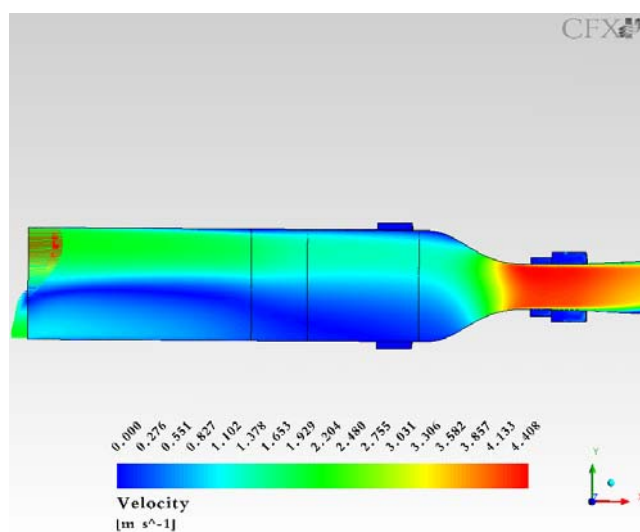
Приведенные далее результаты расчетов получены для следующих значений параметров: плотность основной жидкости $\rho=800 \text{ кг/м}^3$, вязкость $\nu=200 \text{ сСт}$, плотность воды $\rho_v=1005 \text{ кг/м}^3$, температура на входе $T=10^\circ\text{C}$, скорость на входе $v=1.0 \text{ м/с}$, скорость отбора проб $v_{\text{проб}}=1.0 \text{ м/с}$, рабочее давление на выходе $P_{\text{раб}}=75 \text{ кГ/см}^2$, потери в хонейкомбе $K=1.0 \text{ м}^{-1}$, число $Re=4 \cdot 10^3$.

На Рис. II-5 – II-6 представлены полученные в расчетах распределения скорости и картины линий тока в вертикальной плоскости симметрии задачи в области сопла, камеры давления, камеры отбора проб и входа в диффузор; профили скорости в различных сечениях входного участка, сопла и диффузора; распределение гидравлических потерь вдоль всего тракта формирователя.

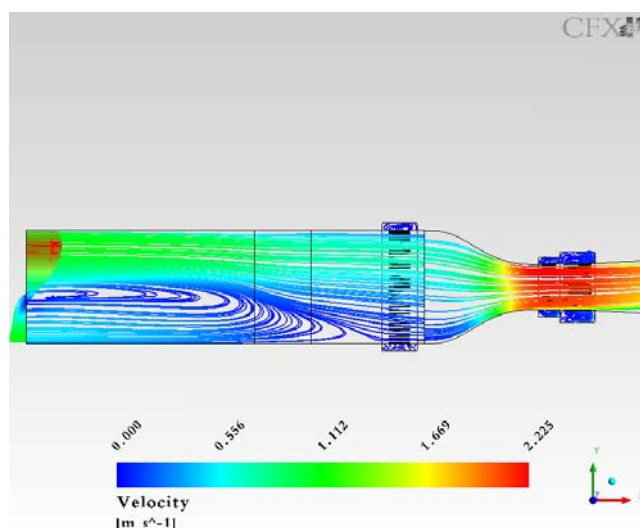
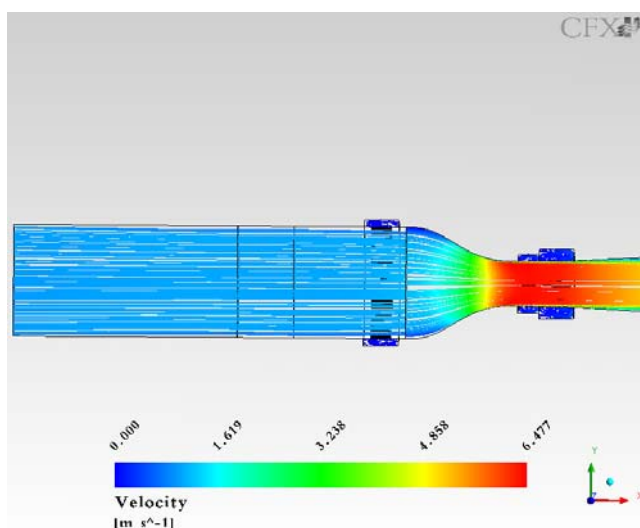
1.Равномерный профиль скорости на входе



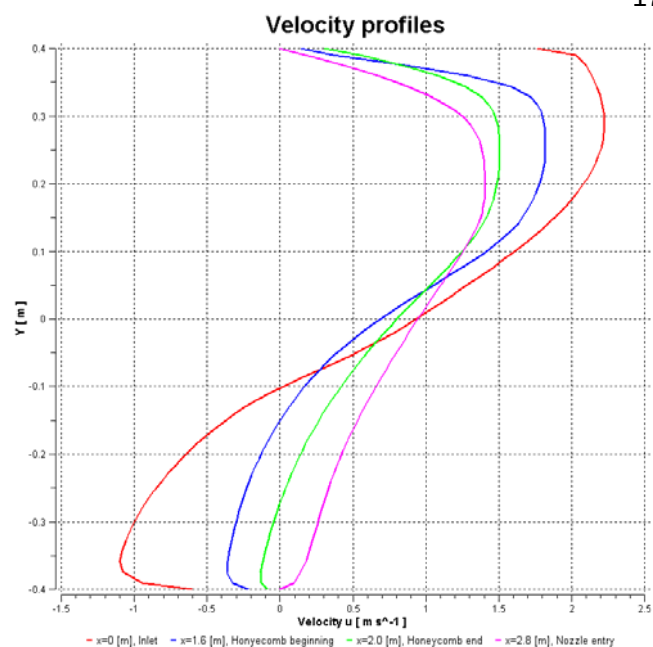
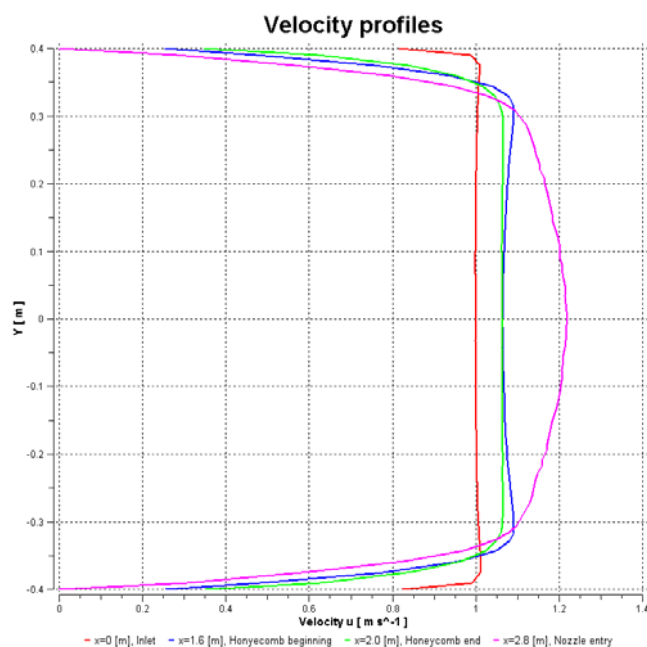
2.«Жесткий» вариант неравномерности



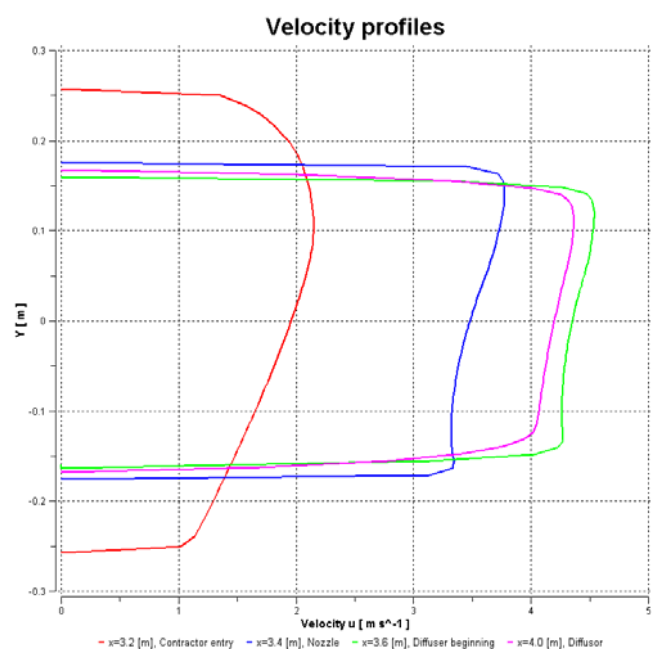
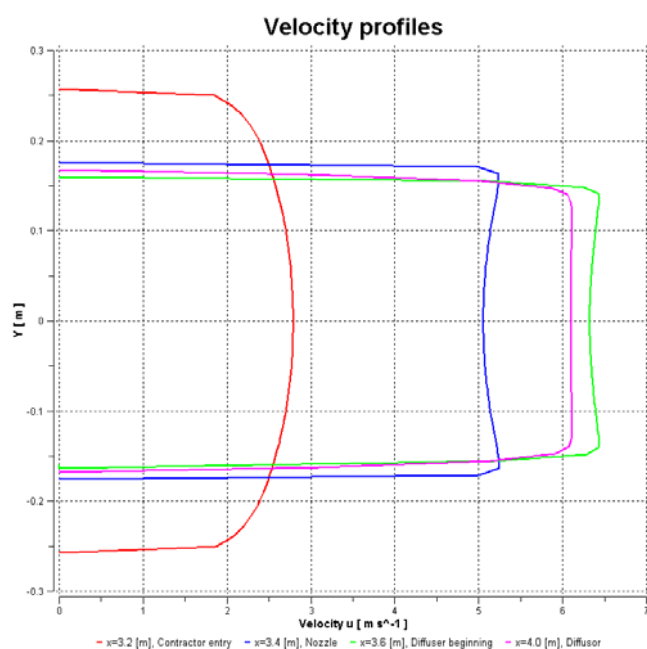
Поле скоростей в вертикальной плоскости симметрии формирователя и профиль скорости на входе



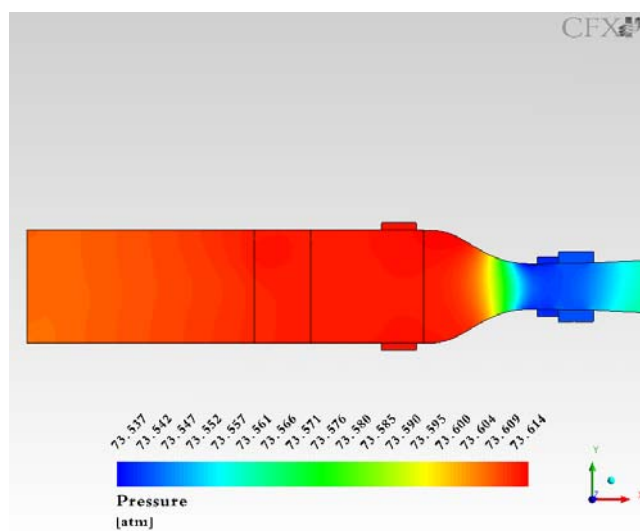
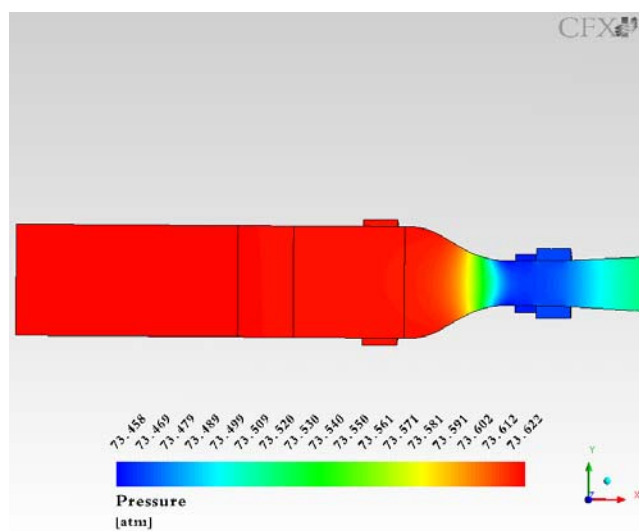
Линии тока



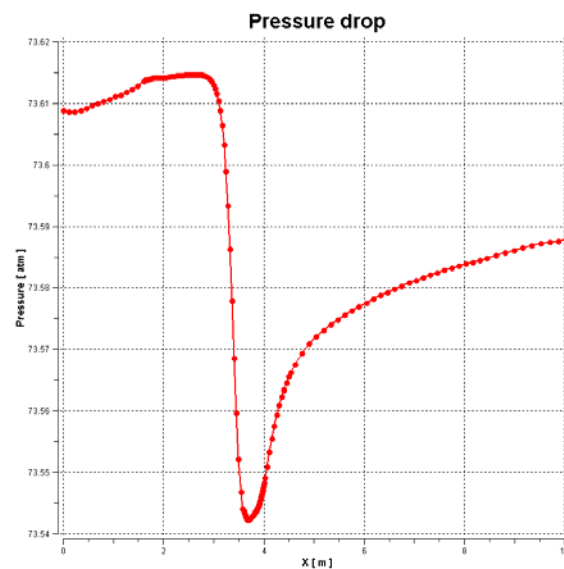
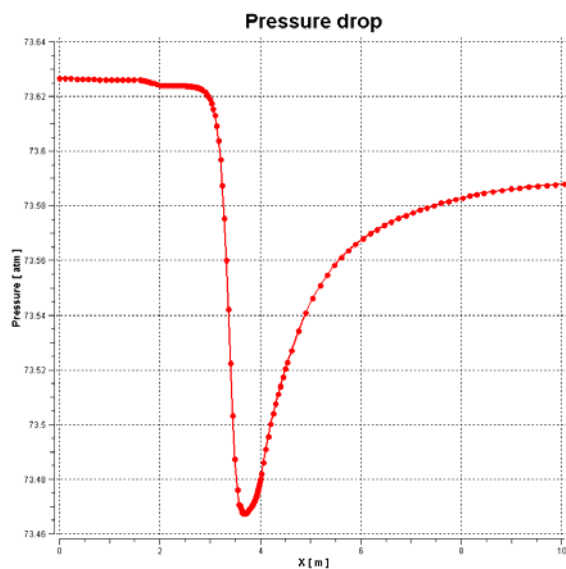
Профили скорости перед соплом



Профили скорости на входе в сопло, в горле сопла и в диффузоре



Поле давления



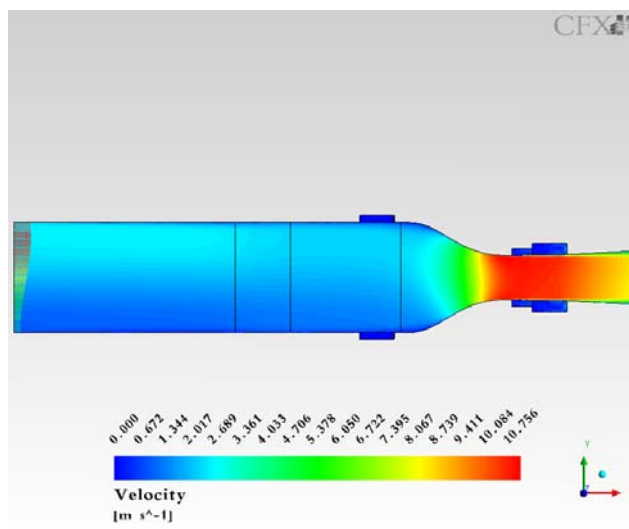
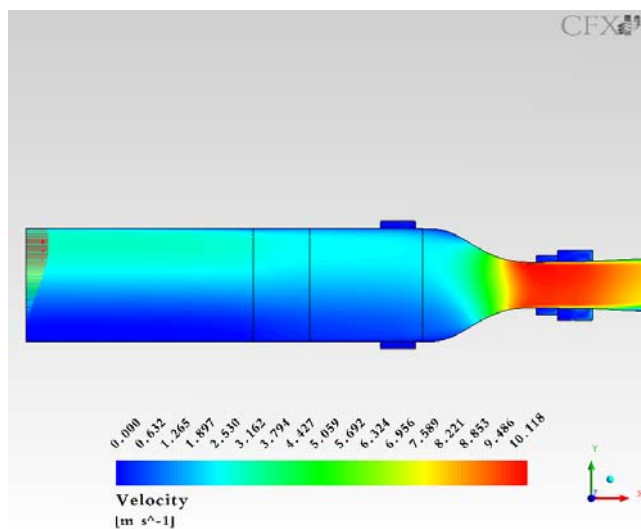
Потери давления по длине тракта

Рис. II-5

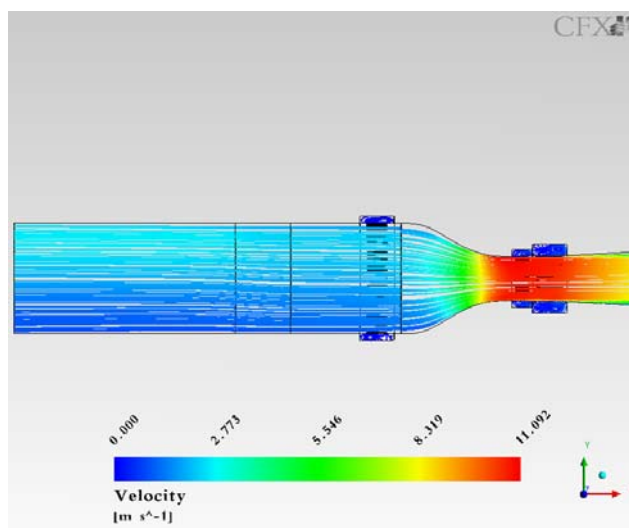
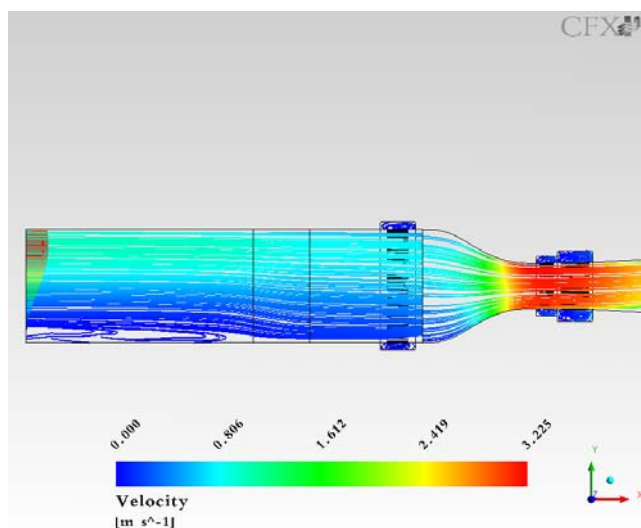
3.«Мягкий» вариант неравномерности

4.Средняя неравномерность

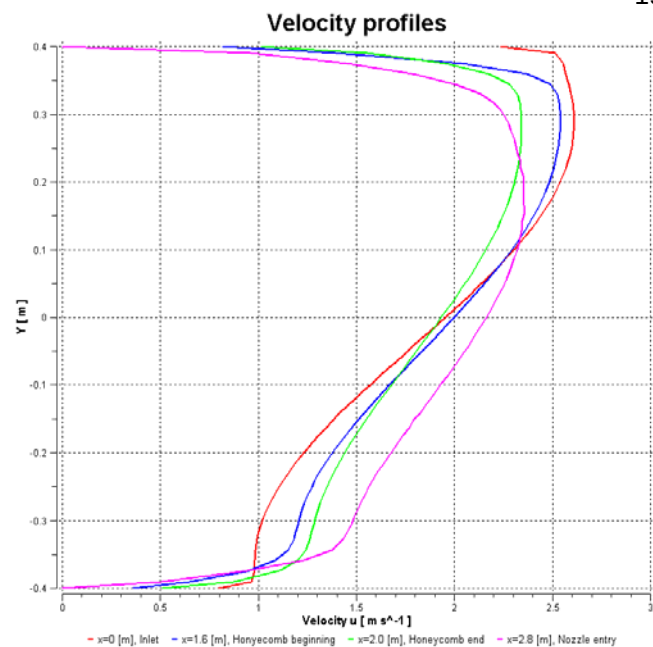
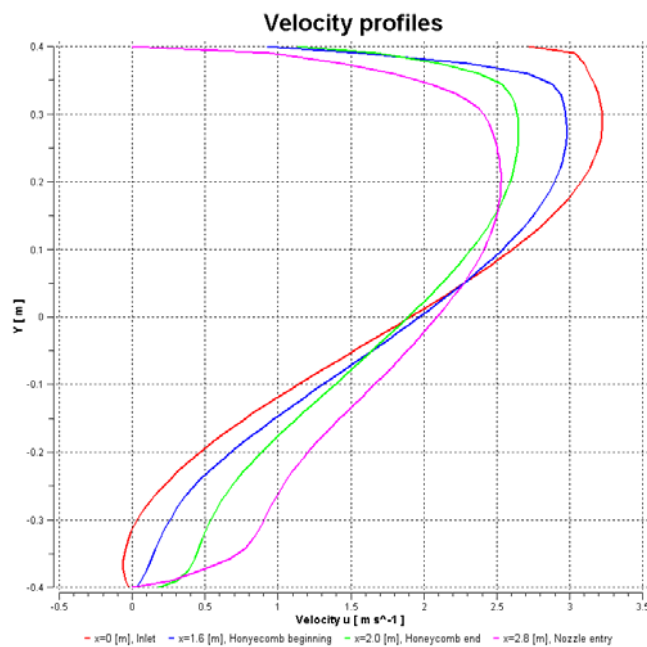
$$U_{\min}=1 \text{ м/с}, U_{\max}=2.5 \text{ м/с}$$



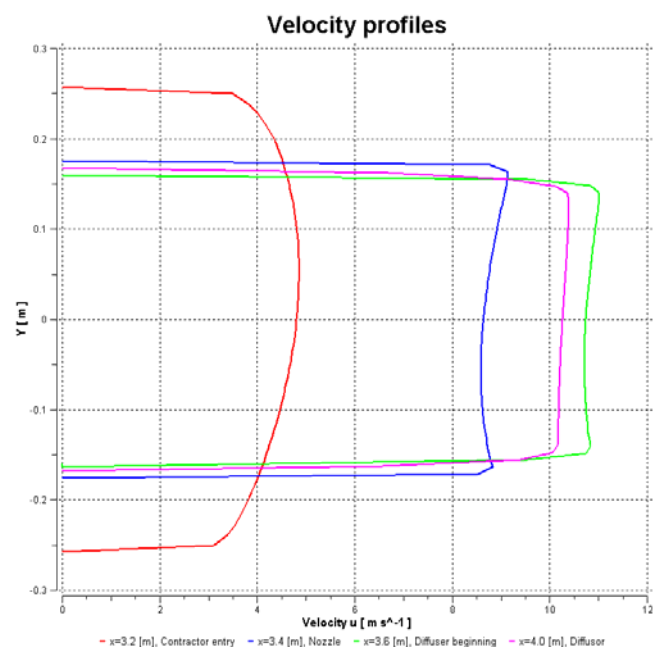
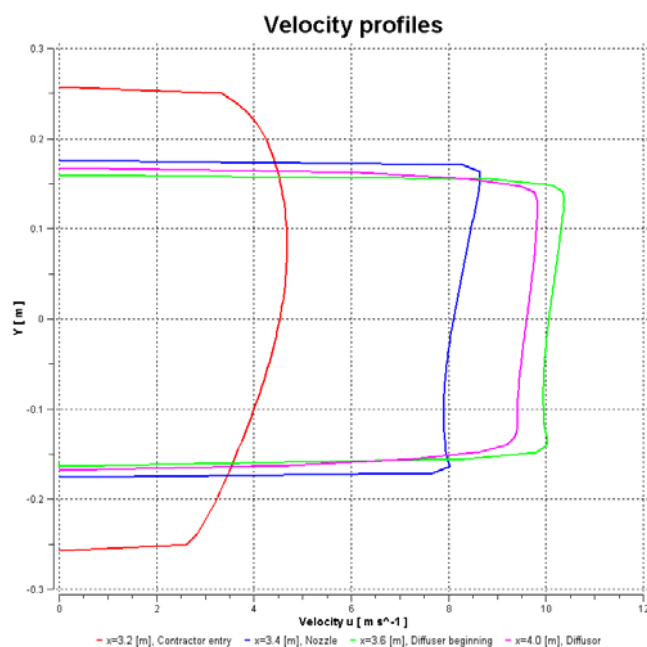
Поле скоростей в вертикальной плоскости симметрии формователя и профиль скорости на входе



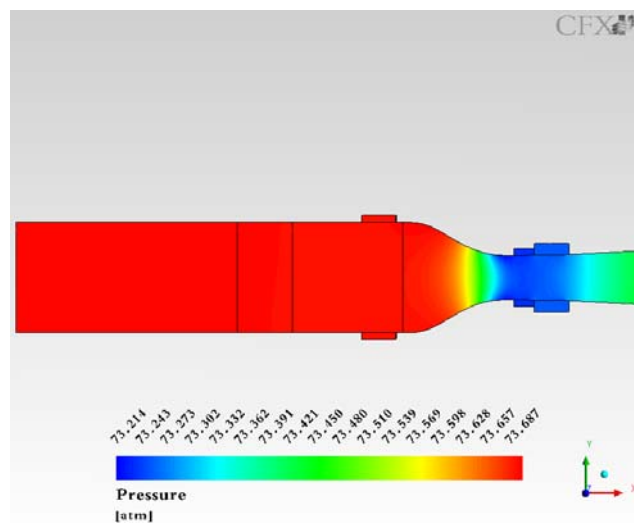
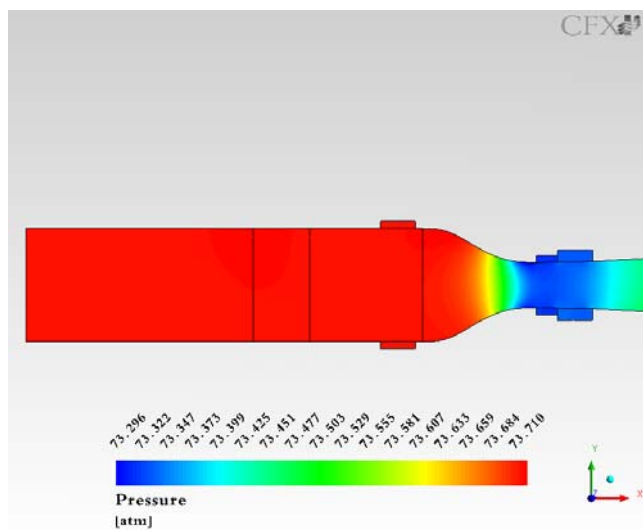
Линии тока



Профили скорости перед соплом



Профили скорости на входе в сопло, в горле сопла и в диффузоре



Поле давления

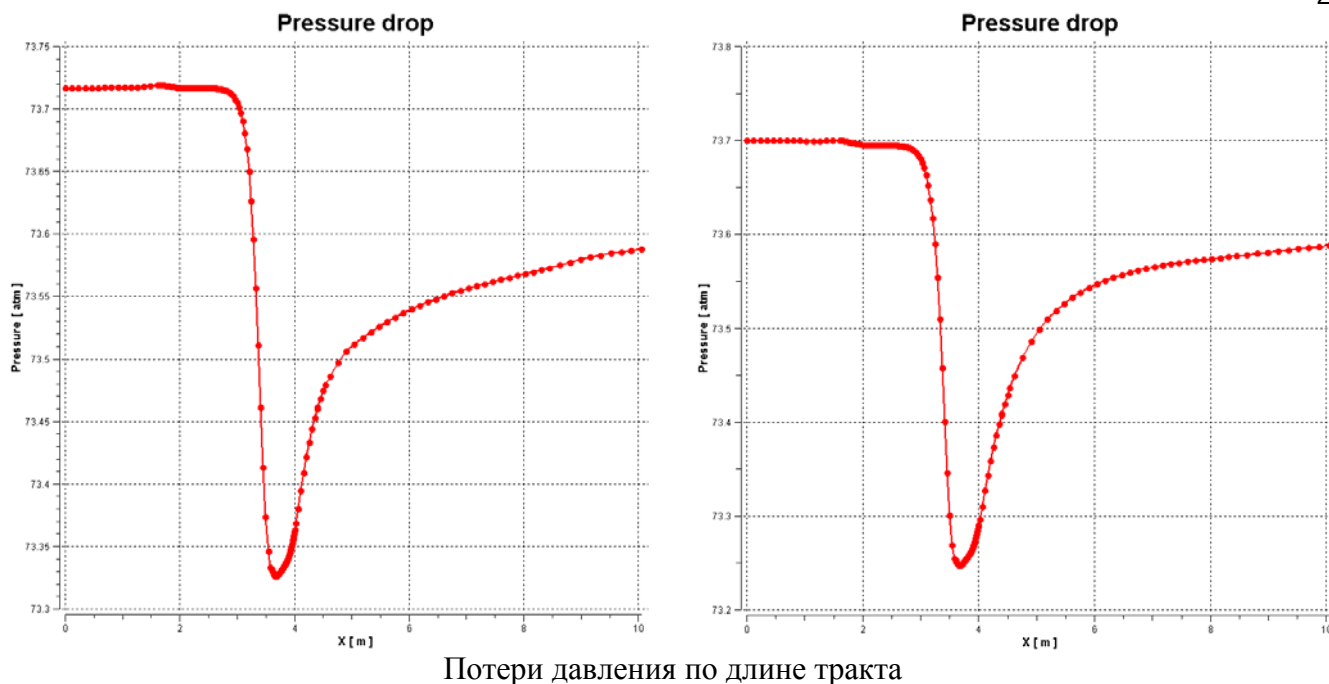


Рис. II-6

Анализ результатов численного моделирования влияния различного характера профиля скорости на входе в формователь на процессы формирования и перемешивания многокомпонентной жидкой смеси (раствора), например, нефти, в сопле показал, что для 5-ти различных вариантов функциональной зависимости профиля скорости во входном сечении, от равномерного (симметричного) до несимметричного, сильно неравномерного по высоте и переменного по знаку потока, течение после прохождения хонейкомба перед входом в сопло существенно выравнивается, области обратного течения исчезают, несимметрия профилей скорости в горле сопла и в диффузоре практически «выполаживается», и распределение скоростей приближается к «равномерному» режиму. Картина распределения давления в формователе практически не зависит от вида профиля скорости на входе, уровень гидравлических потерь по всей длине тракта не увеличивается в сравнении с режимом равномерного потока на входе, и наблюдается высокая точность ($0.06\% \div 0.15\%$) определения давления в ядре потока нефти в сопле по измерениям давления в камере давления. Следует отметить, что в качестве рабочей среды была рассмотрена двухкомпонентная жидкая смесь (раствор) основной вязкой жидкости (98.5%), например, нефти, и жидкой примеси (1.5%), например, воды; выбран наиболее «критический» гидродинамический режим течения с наименьшим числом $Re=4 \cdot 10^3$. Результаты расчетов, полученные в рамках модели жидкой смеси (раствора), подтверждают высокие расходометрические характеристики формователя «Струя», проанализированные в первой части работы в рамках модели однокомпонентной вязкой жидкой среды, и обеспечение формователем «Струя» достаточной представительности и однородности проб в камере отбора проб.

III. Моделирование многофазных негомогенных течений в рамках модели жидких пар (основная жидкость + мелкодисперсная жидкая примесь)

В третьей части работы сделаны расчетно-теоретические оценки скорости стратификации капель воды в потоке основной жидкости. Показано, что процессы

оседания взвеси воды под действием массовых сил не влияют на результаты измерения давления и качества потока в мерном устройстве «Струя».

1. Расчет скорости стратификации мелкодисперсной жидкой примеси в потоке основной жидкости

Модель жидких пар предполагает, что перемешивание между компонентами происходит на больших, чем молекулярных, масштабах (негомогенные неоднородные течения). Каждая жидкая фракция имеет свои физические (плотность, вязкость и др.) и гидродинамические (скорость, температура) параметры. Общим для компонент является только поле статического давления. В условиях гравитационного поля для фракций многофазной дисперсной среды, имеющих различную величину плотности, необходимо учитывать процессы стратификации.

Проведены расчетно-теоретические оценки возможного влияния процесса оседания капель мелкодисперсной жидкости, например, воды, содержащихся в основном потоке, например, нефти, под действием массовых сил на результаты измерения качества потока в тракте формирователя «Струя».

Рассмотрим каплю воды сферической формы и запишем для нее уравнение движения в потоке вязкой жидкости в вертикальном направлении:

$$m \cdot dw/dt = P - A - F \quad (3),$$

здесь m - масса капли, w - скорость капли по вертикали (в направлении стратификации), t - время, dw/dt - ускорение капли, P - сила тяжести, A - Архимедова сила, F - сила трения. Далее:

$$P = mg, \quad A = mg\rho_n/\rho_v, \quad F = c_x s \rho_n w^2/2,$$

где g - ускорение свободного падения, ρ_n и ρ_v - плотности основной жидкости и воды соответственно, c_x - аэродинамический коэффициент лобового сопротивления капли, s - площадь миделя капли. Интегрируя простое дифференциальное уравнение (3) при начальных условиях $w=0$ при $t=0$, получаем выражение для вертикальной скорости капли:

$$w(t) = gB/D \cdot [(1 - e^{-2BDt}) / (1 + e^{-2BDt})] \quad (4),$$

Здесь $B^2 = 1 - \rho_n/\rho_v$, $D^2 = c_x s g \rho_n / (2m)$. Из выражения (4) видно, что скорость капли достигает своего максимума через бесконечный промежуток времени и значение этой максимальной скорости равно:

$$w_{max} = gB/D$$

Движение капель воды с диаметром порядка $d=0.5-1$ мм в потоке вязкой жидкости является ламинарным, числа Рейнольдса при этом $Re < 1$, коэффициент сопротивления капли c_x определяется по формуле [3]:

$$c_x = 24/Re, \quad Re = wd/\nu,$$

где ν - коэффициент кинематической вязкости основной жидкости. Если задаться следующими значениями параметров: $\rho_n = 900$ кг/м³, $\rho_v = 1057$ кг/м³, $d = 0.5$ мм, $\nu = 50 \cdot 10^{-6}$ м²/с, то для максимальной скорости капли воды получим значение $w_{max} = 0.5$ мм/с.

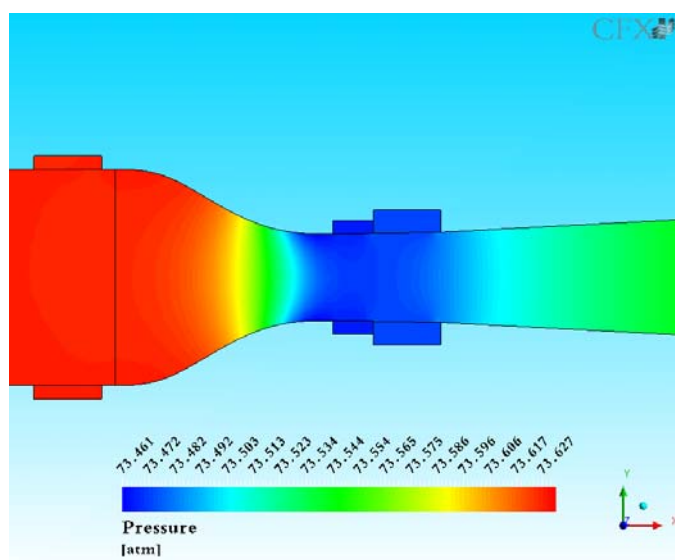
Таким образом, наши оценки по верхней границе, т. е. по максимальной скорости, показывают, что, если время прохождения потока жидкости (со скоростью 2-3 м/с) вдоль тракта составляет 1-2 с, то взвешенные в основной жидкости капли мелкодисперсной воды успеют опуститься лишь на величину одного - двух своего

диаметра (0.5 - 1 мм).

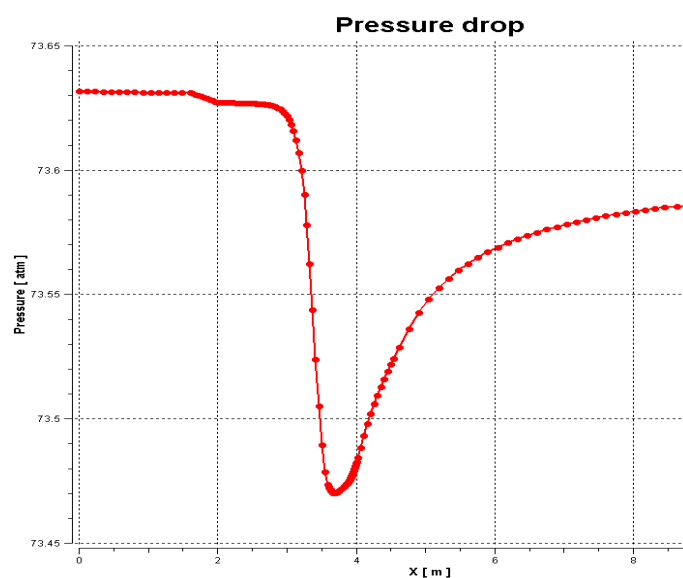
Поэтому можно с уверенностью прогнозировать, что процессы стратификации капель воды в вязкой жидкости идут достаточно медленно и не повлияют на результаты измерения качества и состава потока в формирователе «Струя», имеющего суммарную длину входного участка и сопла около 4 м.

На Рис. III-1 в качестве иллюстрации представлены распределенные гидродинамические характеристики (поля статического и полного давления, скорости, турбулентной кинетической энергии, геометрия линий тока, величины потерь рабочего давления в тракте формирователя), полученные в рамках модели двухфазной жидкости (нефти) с мелкодисперсной примесью воды (0.5%).

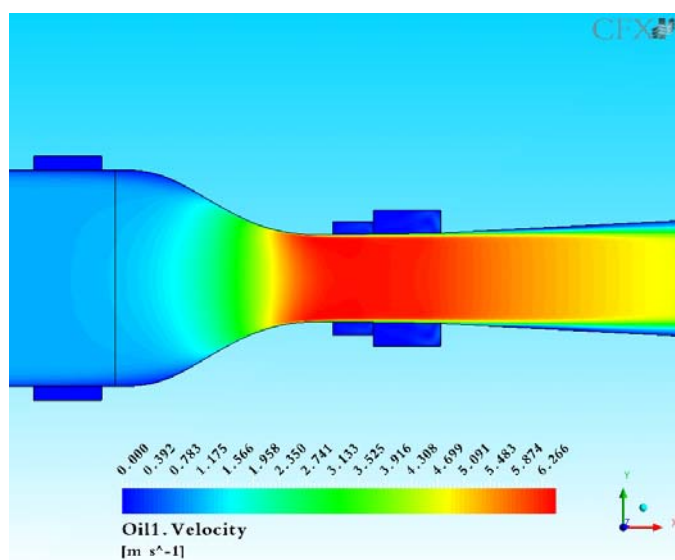
**Вязкость $\nu=200$ сСт, $K=1.0 \text{ м}^{-1}$, плотность $\rho=800 \text{ кг/м}^3$, $d=0.5 \text{ мм}$, температура $T=10^\circ\text{C}$,
скорость $v=1 \text{ м/с}$**



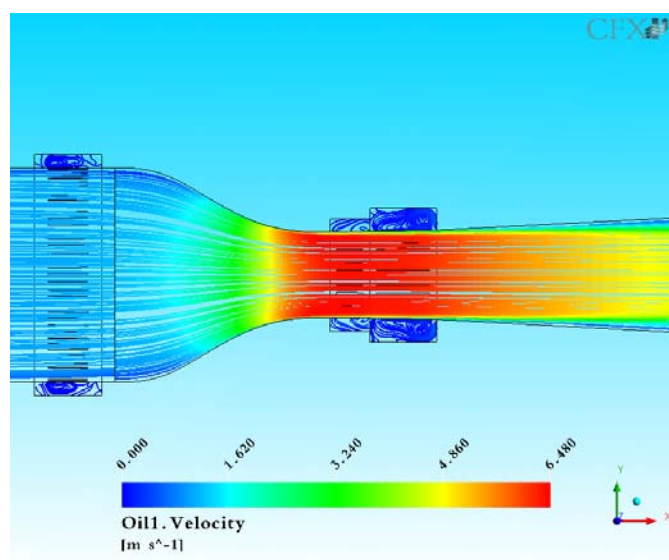
Поле статического давления



Гидродинамические потери давления в тракте



Поле скорости



Линии тока

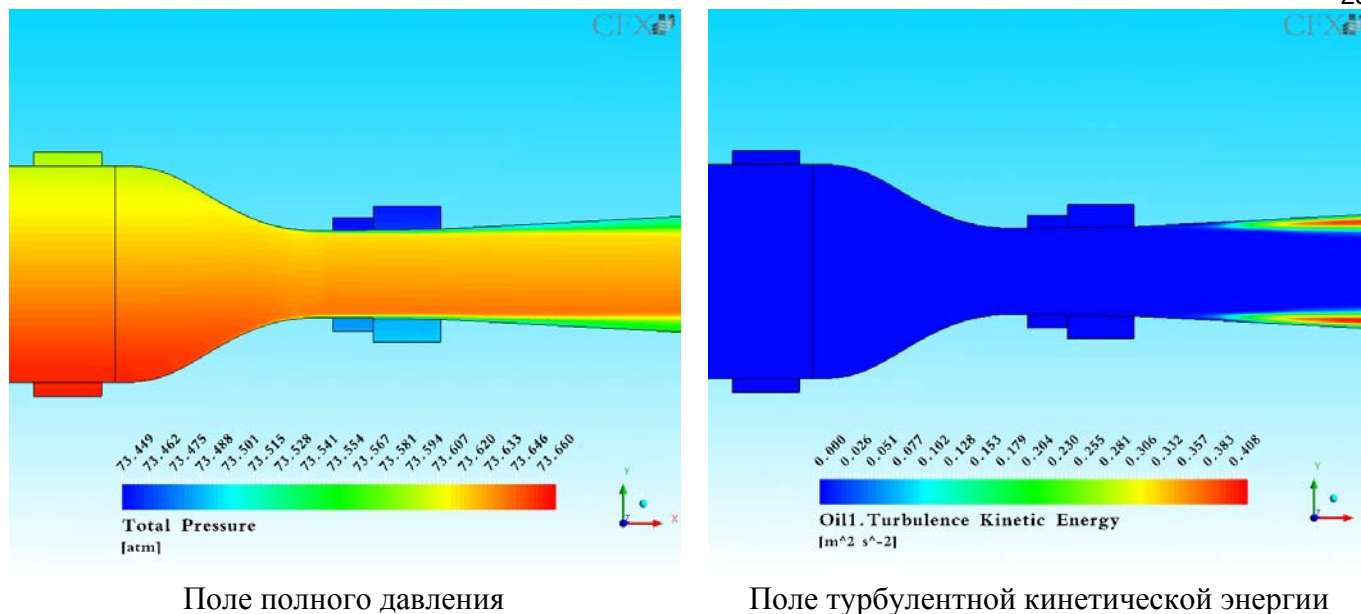


Рис. III-1

Заключение

Компьютерное математическое моделирование течения жидкости в формователе «Струя», проведенное в программном комплексе ANSYS/CFX в рамках 3-х моделей вязкой жидкой среды (модель однокомпонентной несжимаемой жидкости, модель двухкомпонентной жидкой смеси (раствора) и двухфазная модель жидкости с мелкодисперсными жидкими примесями) подтвердило высокие расходометрические характеристики устройства «Струя». Анализ результатов показал:

1. Во всем заданном диапазоне изменения внешних параметров течения (рабочее давление, скорость, температура) и физических параметров среды (плотность и вязкость жидкости) внутри контура формователя, камеры давления и камер для отбора проб формируется устойчивое стационарное ламинарно-турбулентное течение жидкости с низким уровнем гидравлических потерь по всей длине тракта ($0.06\% \div 0.35\%$ от рабочего давления).
2. Разработанная конструкция формователя «Струя» позволяет с высокой точностью ($0.05\% \div 0.15\%$) определять давление в ядре потока жидкости в сопле (и, соответственно, скорость и расход жидкости) по измерениям статического давления в камере забора давления, расположенной вокруг сопла.
3. Формователь «Струя» обеспечивает перемешивание всех компонентов перекачиваемой жидкости и выравнивание распределения скорости до получения равномерного и однородного по сечению трубопровода потока.
4. Расчетно-теоретические оценки возможного влияния стратификации, т.е. оседания мелко дисперсных капель другой жидкости, содержащихся в основной жидкости, под действием массовых сил, показали, что процессы стратификации взвеси воды в вязкой жидкости (нефти) идут достаточно медленно и не могут повлиять на результаты измерения показателей давления, качества и состава потока в формователе «Струя».

Литература

1. Стариков В.П. Измеритель расхода жидкости и газов «Струя». Материалы. 12-й конференции «Совершенствование измерений расхода жидкости, газа и пара», СПб.: Борей-Арт, стр. 13-21, 23-25 апреля 2002. г.
2. Стариков В.П., Калинин Ю.С., Лобанова Т.П., Нарышкин В.Ф., Николенко Л.И., Островский Н.А., Советникова С.И., Тарабрин А.П. Проблемы повышения энергосбережения, экономической и технологической эффективности нагнетателей и газопроводов КС. Материалы 19-й международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей», СПб.: Борей-Арт, стр. 123-129, 20-22 апреля 2004 г.
3. Идельчик И.Е. «Справочник по гидравлическим сопротивлениям», 3-е издание, Москва, «Машиностроение», 1992.
4. Стариков В.П., Владимирова Н.А. Расходометрические характеристики формирователя "Струя": расчет течения жидкости и гидравлических потерь. Материалы 24-й международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей», СПб.: Борей-Арт, стр. 120-126, 21-22 ноября 2006 г.
5. Стариков В.П., Владимирова Н.А. Анализ влияния входного профиля скорости на качество потока в тракте формирователя "Струя" и расчет скорости стратификации мелкодисперсной жидкой примеси. Материалы 24-й международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей», СПб.: Борей-Арт, стр. 113-119, 21-22 ноября 2006 г.
6. Стариков В.П., Владимирова Н.А. Формирователь непрерывной репрезентативной пробы на базе технологии «Струя». Материалы 24-й международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей», СПб.: Борей-Арт, стр. 107-112, 21-22 ноября 2006 г.

Сведения об авторах:

Стариков Владислав Петрович, к.т.н., Генеральный директор ООО НПП «Высокие инженерные технологии», 117335, г. Москва, ул. Архитектора Власова, д. 21, корп. 3, тел. (495)767-53-31, факс (495)775-38-22; e-mail: starikovit@mail.ru.

Владимирова Наталья Алексеевна, к.ф.-м.н., главный научный сотрудник ООО НПП «Высокие инженерные технологии», 117335, г. Москва, ул. Архитектора Власова, д. 21, корп. 3, тел. (916)601-47-48, факс (495)775-38-22; ведущий научный сотрудник ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», 140180, г. Жуковский Московской обл., ул. Жуковского, 1, тел. (495)556-41-22; e-mail: vlana@progtech.ru.