

Способы моделирования пористости в среде FlowVision 3.08

Уравнение Навье – Стокса во FlowVision

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\bar{\nabla} P + \bar{\nabla} \cdot \hat{\boldsymbol{\tau}}_{\text{eff}} + \boxed{\mathbf{S}} + \mathbf{S}_{\text{user}}$$
$$\boxed{(\rho - \rho_{\text{hyd}}) \mathbf{g} + \rho \mathbf{B} + \boxed{\mathbf{R}}}$$

Объемная сила изотропного сопротивления: $\boxed{\mathbf{R} = -D\mathbf{V}} \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$

Обобщенный нелинейный закон фильтрации, обобщенный закон Форхгеймера:

$$\bar{\mathbf{R}} = \bar{\nabla} p = -a\bar{\mathbf{V}} - b|\mathbf{V}|\bar{\mathbf{V}} \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$$
$$D = a + b|\mathbf{V}| \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}$$

где a и b – эмпирические константы, характеризующие свойства пористой среды и жидкости в ней.

Задачи фильтрации широко рассматриваются в различных областях машиностроения, нефтегазовой и химической промышленности, и в каждой из этих областей предлагаются свои формулы и зависимости для определения материальных констант a и b .

Пример:

В литературе по нефтегазовой промышленности наиболее распространены следующие значения для материальных констант:

1) $a = \frac{\mu}{k}$; $b = \beta \frac{\rho}{\sqrt{k}}$ где μ - динамическая вязкость жидкости (газа); k - коэффициент проницаемости; β - дополнительная константа пористой среды (определяется экспериментально); ρ - плотность жидкости (газа)

2) $a = \frac{\mu}{k}$; $b = \frac{\rho}{l}$ где l - коэффициент макрошероховатости пористой среды

3) $a = \frac{\mu}{k_{\mu}}$; $b = \frac{\rho}{k_{\rho}}$ где k_{μ} - коэффициент проницаемости для вязкой жидкости; k_{ρ} - коэффициент проницаемости несжимаемой жидкости

Анализ нелинейного закона Форхгеймера

Пусть: $a = \frac{\mu}{k}$; $b = \beta \frac{\rho}{\sqrt{k}}$

$$\bar{R} = \boxed{-\frac{\mu}{k} \bar{V}} - \boxed{\beta \frac{\rho}{\sqrt{k}} |V| \bar{V}}$$


Потери давления вследствие
вязкости жидкости

Инерционная составляющая
сопротивления движению жидкости,
связанная с криволинейностью и
извилистостью поровых каналов

При малых скоростях фильтрации квадратом скорости $|V| \bar{V}$ можно пренебречь, и градиент давления будет зависеть только от первого слагаемого.

При больших скоростях фильтрации силы инерции становятся существенными и будут сопоставимы или даже преобладать над силами вязкости (во втором случае градиент давления будет зависеть только от второго слагаемого).

Способы задания изотропного сопротивления во FlowVision

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\bar{\nabla} P + \bar{\nabla} \cdot \hat{\mathbf{t}}_{\text{eff}} + (\rho - \rho_{\text{hyd}}) \mathbf{g} + \rho \mathbf{B} + \mathbf{R} + \mathbf{S}_{\text{user}}$$

$$\text{где } \mathbf{R} = -\bar{\nabla} P = -D \mathbf{V}$$

- 1) Если известно значение объемной силы сопротивления, то с помощью модификатора объемной силы задаем значение S_{user} через компоненты силы сопротивления (задаем S_{user} вместо R):
- 2) Если известен перепад давления ΔP на участке с пористой средой длиной ΔL , то сопротивление можно задать с помощью модификатора объемной силы: $S_{\text{user}X} = -\Delta P / \Delta x$; $S_{\text{user}Y} = -\Delta P / \Delta y$; $S_{\text{user}Z} = -\Delta P / \Delta z$;
- 3) С помощью модификатора изотропного сопротивления: $D = a + b/|V|$

Материальные константы a и b берутся из справочника.

При разных режимах течения возможно использовать упрощенные формы записи:

3.2) При больших скоростях: $D = b|V|$

3.3) При малых скоростях: $D = a$ (Закон Дарси)

Важно! Особенность использования модификатора сопротивления

Изотропное сопротивление также можно задать по перепаду давления ΔP с помощью модификатора Сопротивление. В этом случае коэффициент изотропного сопротивления будет иметь вид:

$$D = \frac{\Delta P}{\Delta L \cdot |V|}$$

!!!

При задании изотропного сопротивления необходимо учитывать, что скорость стоит в знаменателе. Если скорость в объеме модификатора равна нулю, произойдет деление на ноль. Тогда, например, в описанном выше выражении можно добавлять к модулю скорости значение 0.00001 . Данная величина внесет в результаты расчета незначительную погрешность, но предотвратит от деления на ноль.

$$D = \frac{\Delta P}{\Delta L \cdot (|V| + 0.00001)}$$

Важно! Особенность использования модификатора Объемной силы

!!!
Модификатор Объемная сила некорректно использовать для задания сопротивления через перепад давления, когда направление потока на отдельных участках модификатора может развернуться по направлению Объемной силы.

Поток может развернуться, например, встретив геометрическое препятствие сразу после модификатора.

Тогда объемная сила сопротивления превратится в разгоняющую силу.

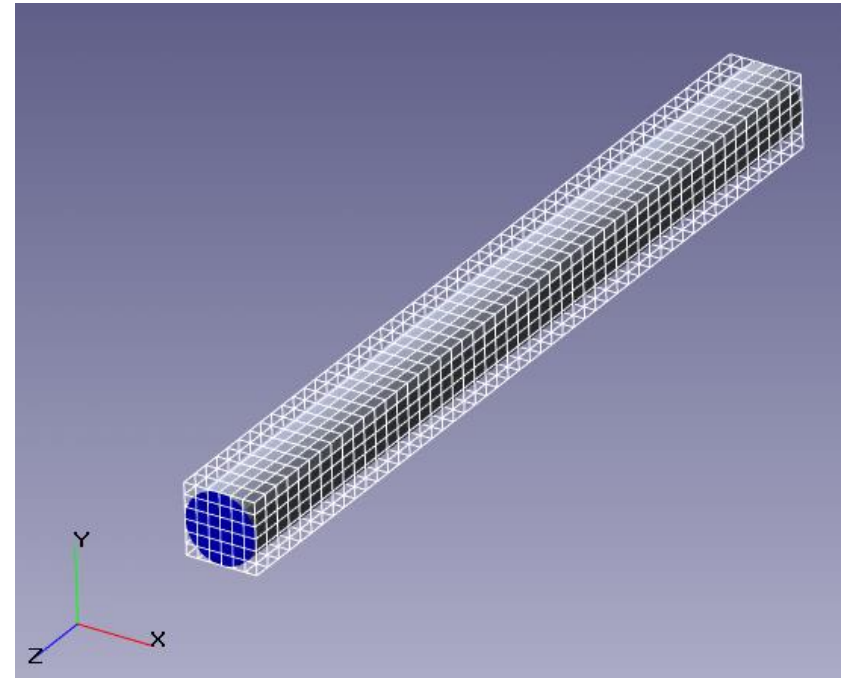
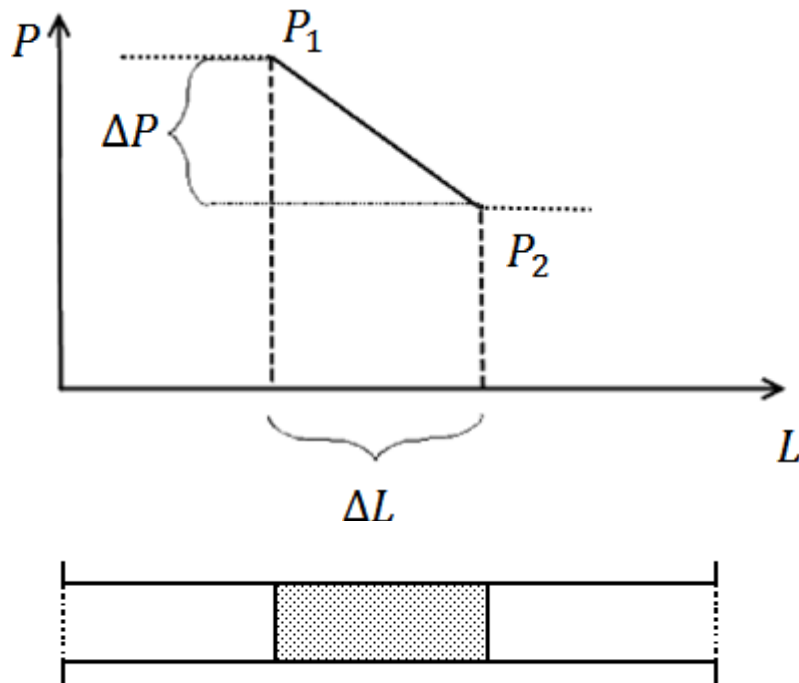
Поэтому в таких случаях рекомендуется задавать силу изотропного сопротивления с помощью модификатора изотропного Сопротивления, при использовании которого сила сопротивления всегда направлена против вектора скорости.

Примеры задания сопротивления в пористых средах

Моделирование сопротивления пористой среды при известном перепаде давления

Моделирование пористой среды с помощью задания перепада давления

Предположим, что давление в пористой среде меняется линейно на $\Delta P = 200 \text{ Па}$ вдоль оси Z на некотором участке длиной $\Delta L = 0.04 \text{ м}$.

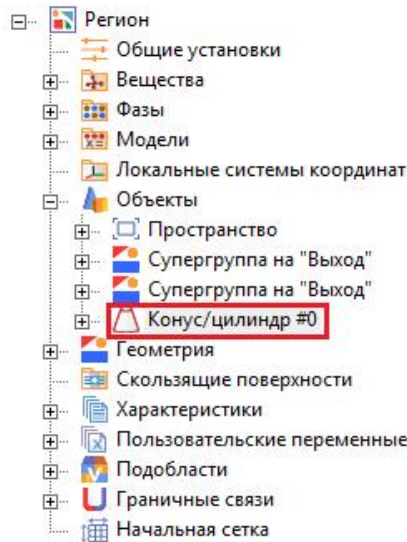


Следовательно: $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$; $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$; $\frac{\partial P}{\partial z} \approx \frac{\Delta P}{\Delta L}$;

Тогда: $S_{userX} = 0$; $S_{userY} = 0$; $S_{userZ} = -\frac{\Delta P}{\Delta L}$;

Моделирование пористой среды с помощью задания перепада давления

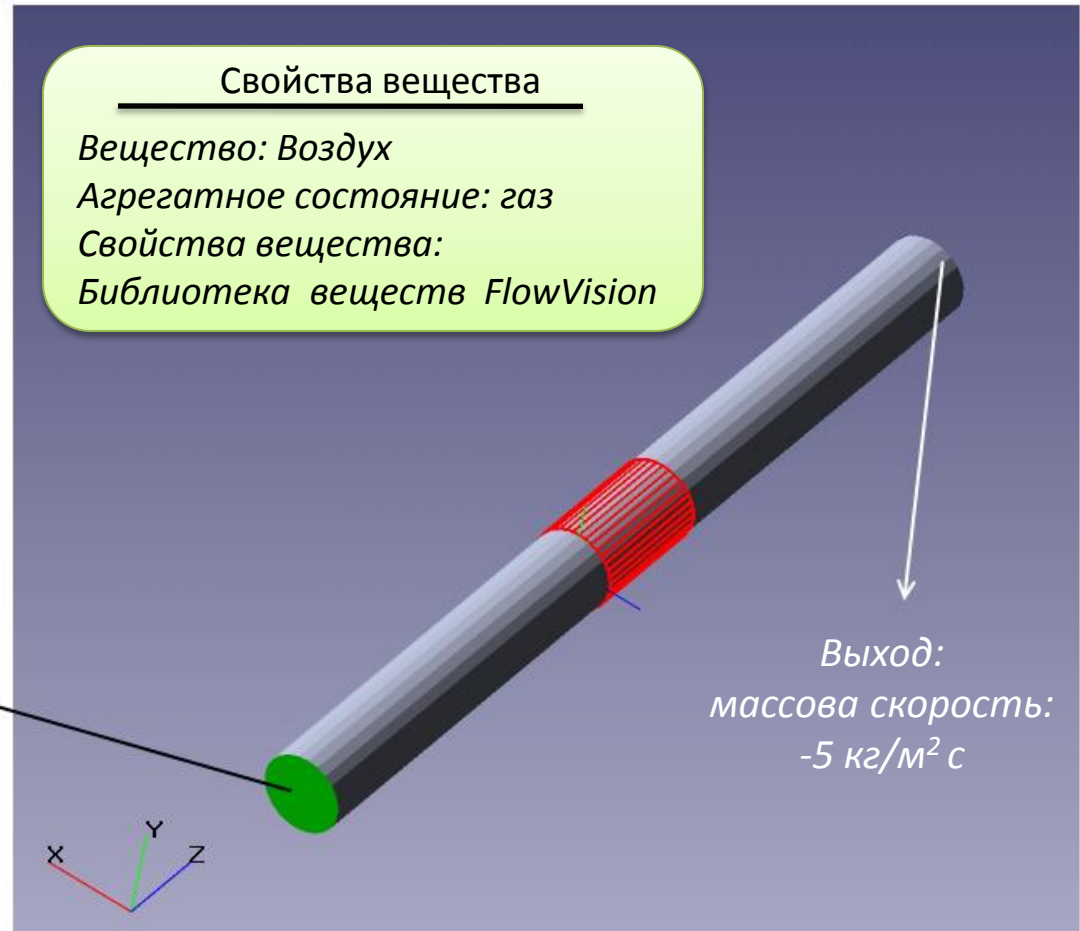
1. Создаем объект, соответствующий объему участка сопротивления



Вход:
массовая скорость:
 $5 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$

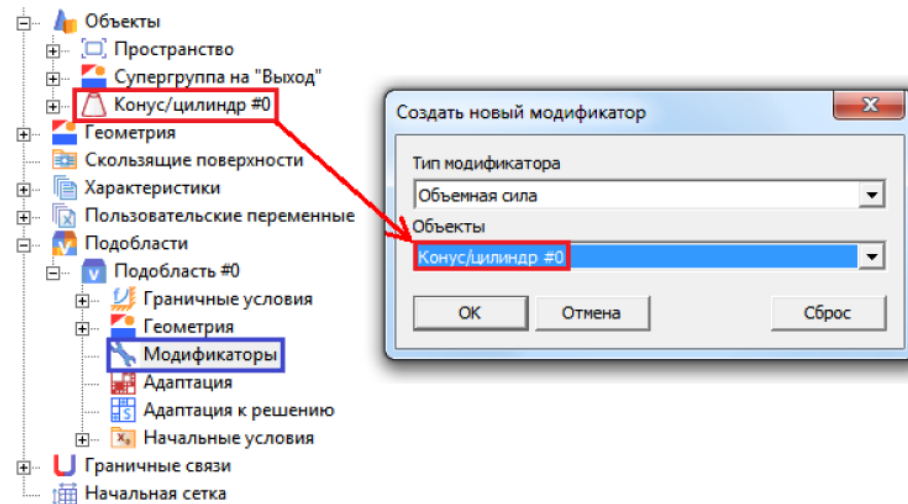
Параметры трубы:

Длина трубы: 0.3 м
Диаметр трубы: 0.025 м
Длина участка
фильтрации : 0.04 м

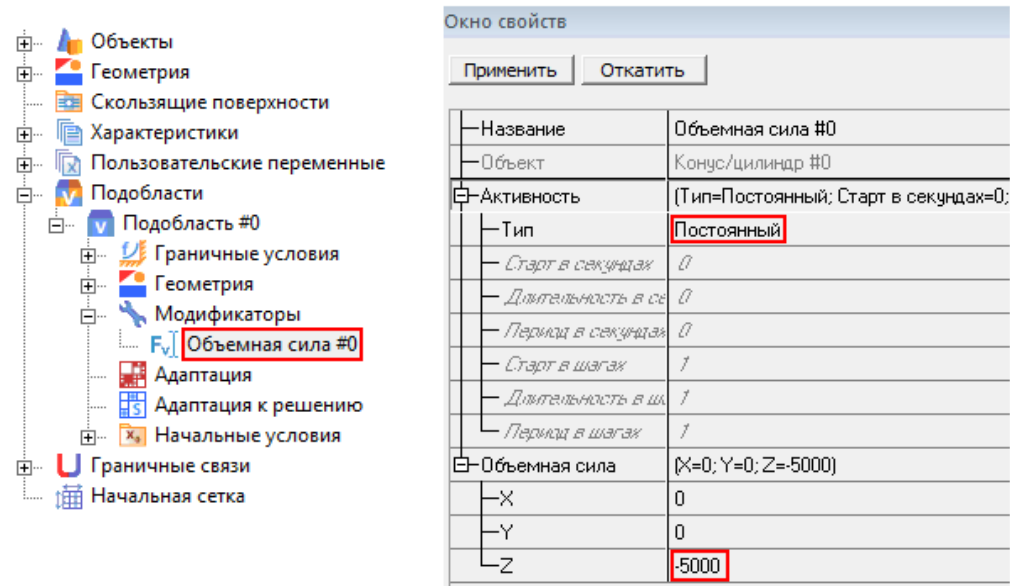


Моделирование пористой среды с помощью задания перепада давления

2. В объеме цилиндра задаем модификатор Объемная сила

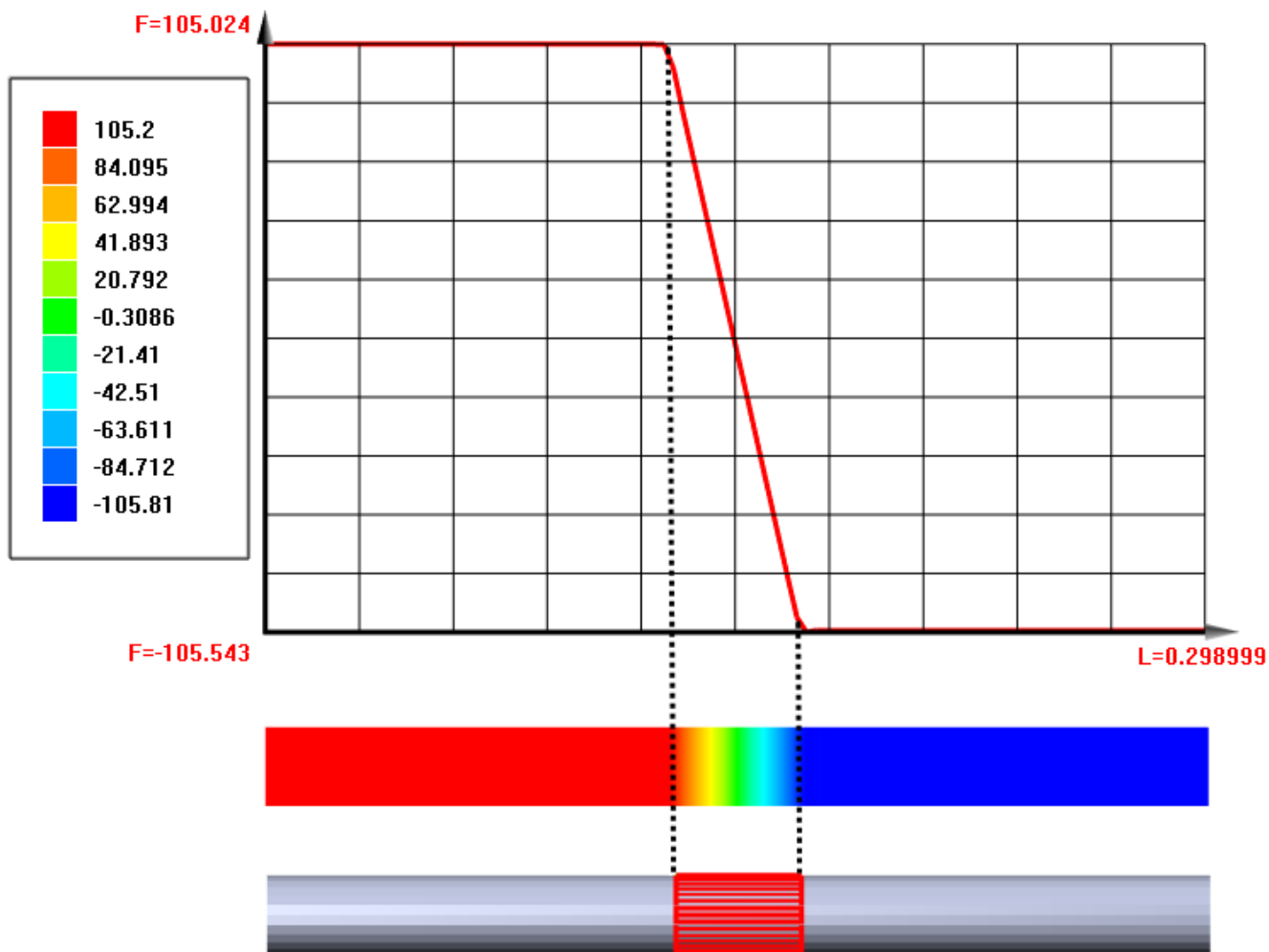


3. Задаем тип активности и значение объемной силы



Моделирование пористой среды с помощью задания перепада давления

Результат расчета:



Моделирование сопротивления
пористой среды с помощью задания
нелинейного закона Форхгеймера

Моделирование пористой среды с помощью задания нелинейного закона Форхгеймера

$$D = a + b|V|$$

Коэффициенты a и b определяются экспериментально или могут быть рассчитаны по характерным зависимостям для данной области машиностроения.

Из эксперимента известны следующие константы для рассматриваемой пористой среды:

$$a = 166,9 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3 \text{С}}$$

$$b = 284,7 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^4}$$

Свойства вещества

Вещество: Воздух

Агрегатное состояние: газ

Свойства вещества:

Библиотека веществ FlowVision

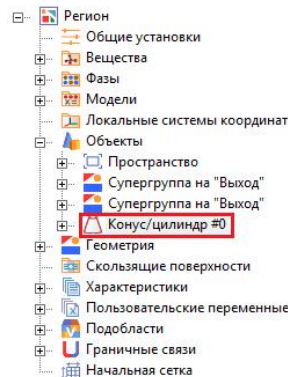
Параметры трубы:

Длина трубы: 0.3 м

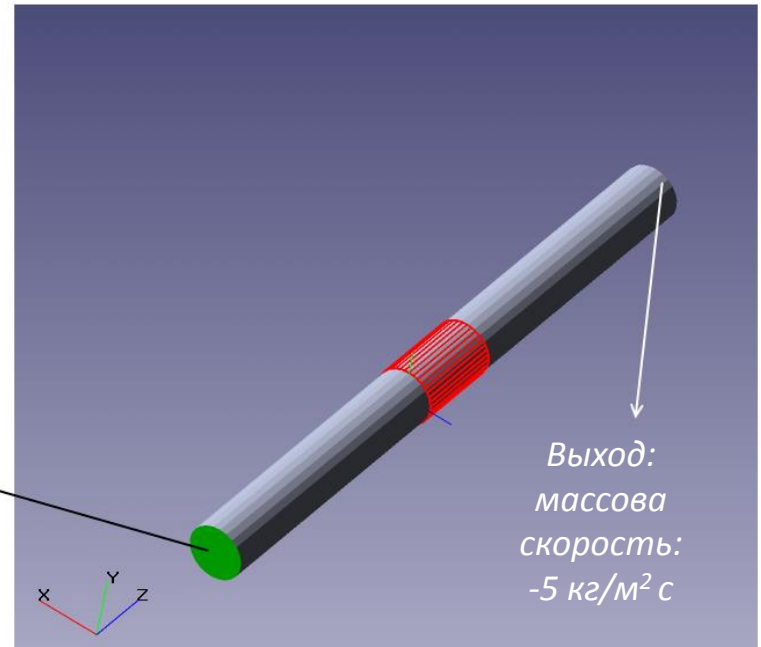
Диаметр трубы: 0.025 м

Длина участка
фильтрации : 0.04 м

1. Создаем объект



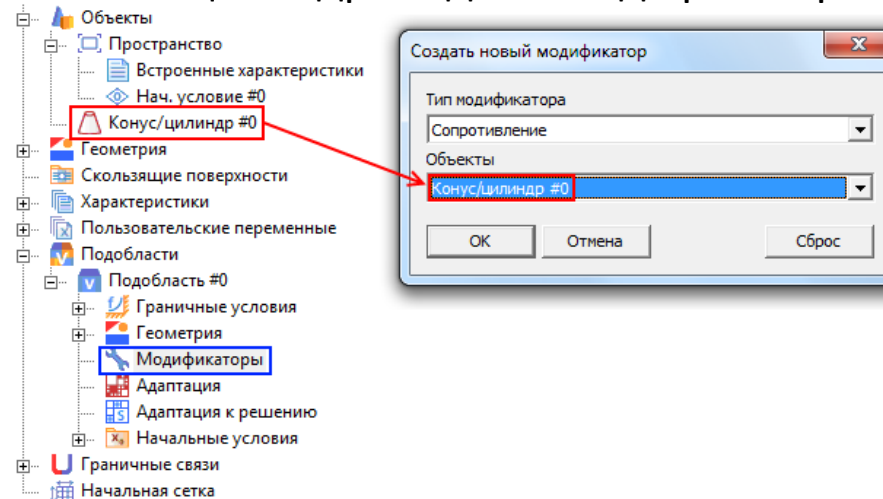
Вход:
массова
скорость:
5 кг/м² с



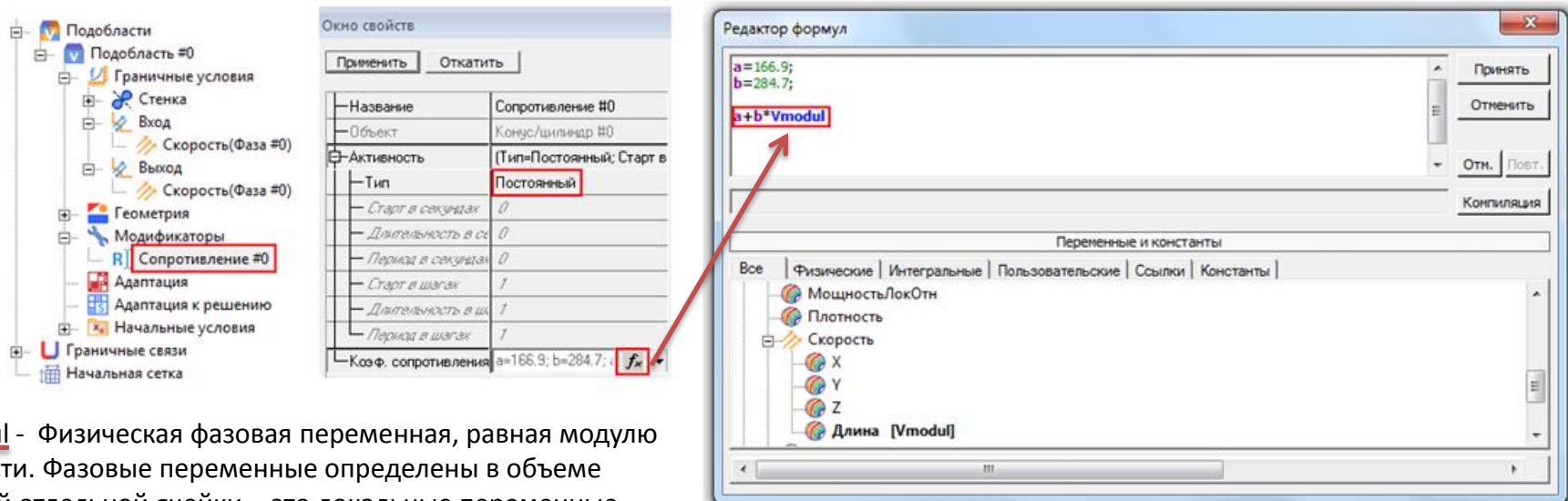
Выход:
массова
скорость:
-5 кг/м² с

Моделирование пористой среды с помощью задания нелинейного закона Форхгеймера

2. В объеме цилиндра задаем модификатор Сопротивление



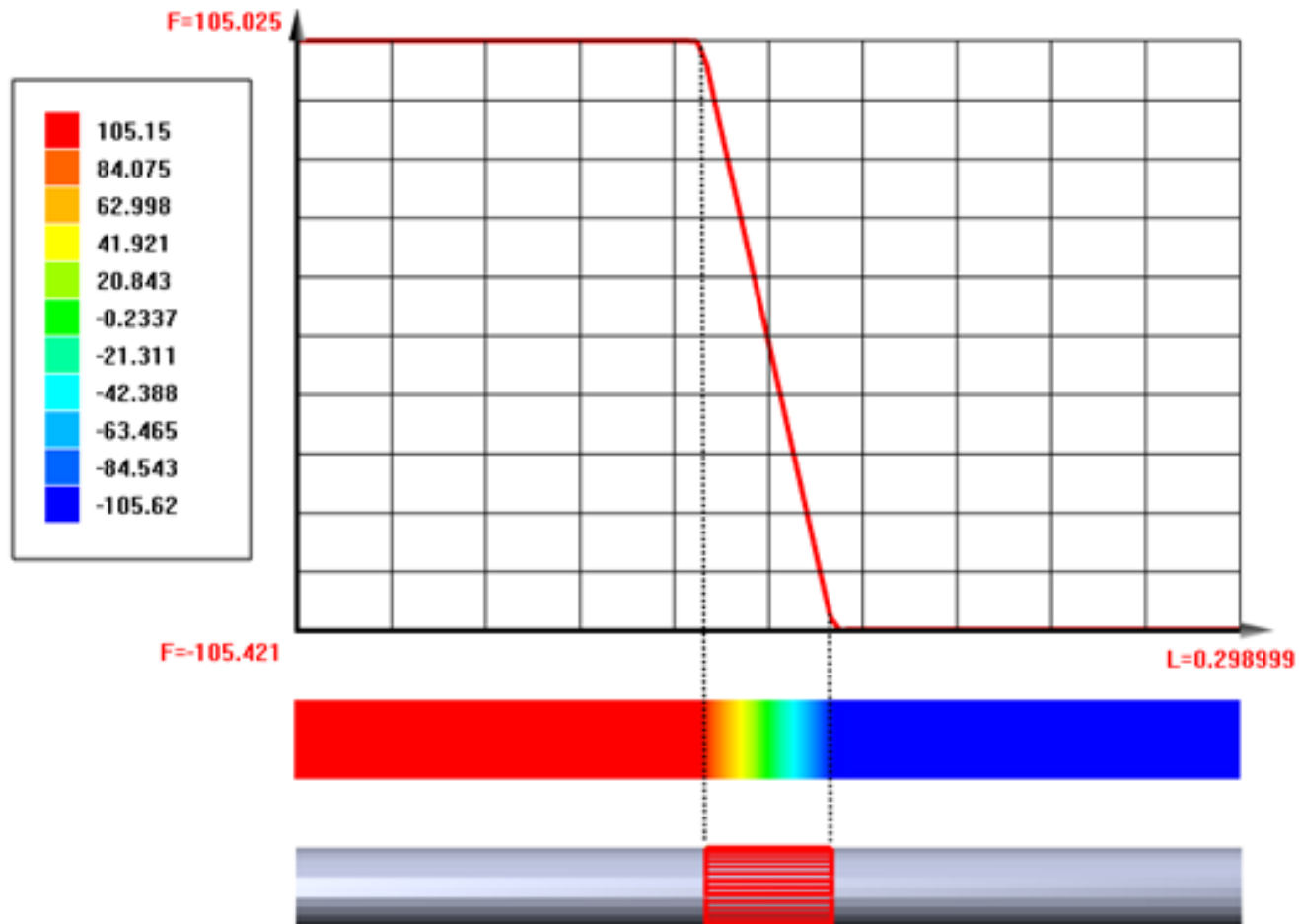
3. Задаем тип активности и значение коэффициента сопротивления



Vmodul - Физическая фазовая переменная, равная модулю скорости. Фазовые переменные определены в объеме каждой отдельной ячейки – это локальные переменные.

Моделирование пористой среды с помощью задания нелинейного закона Форхгеймера

Результат расчета:



Моделирование сопротивления пористой
среды с помощью
сопоставления коэффициента
гидравлического сопротивления ξ с
материальной константой b из закона
Форхгеймера.

Моделирование пористой среды с помощью определения коэффициента гидравлического сопротивления ξ

Рассмотрим случай, когда поток жидкости течет через пучок гладких поперечных труб, расположенных в шахматном порядке

Формула Вейсбаха, определяющая потери давления на гидравлических сопротивлениях, имеет вид:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \rho$$

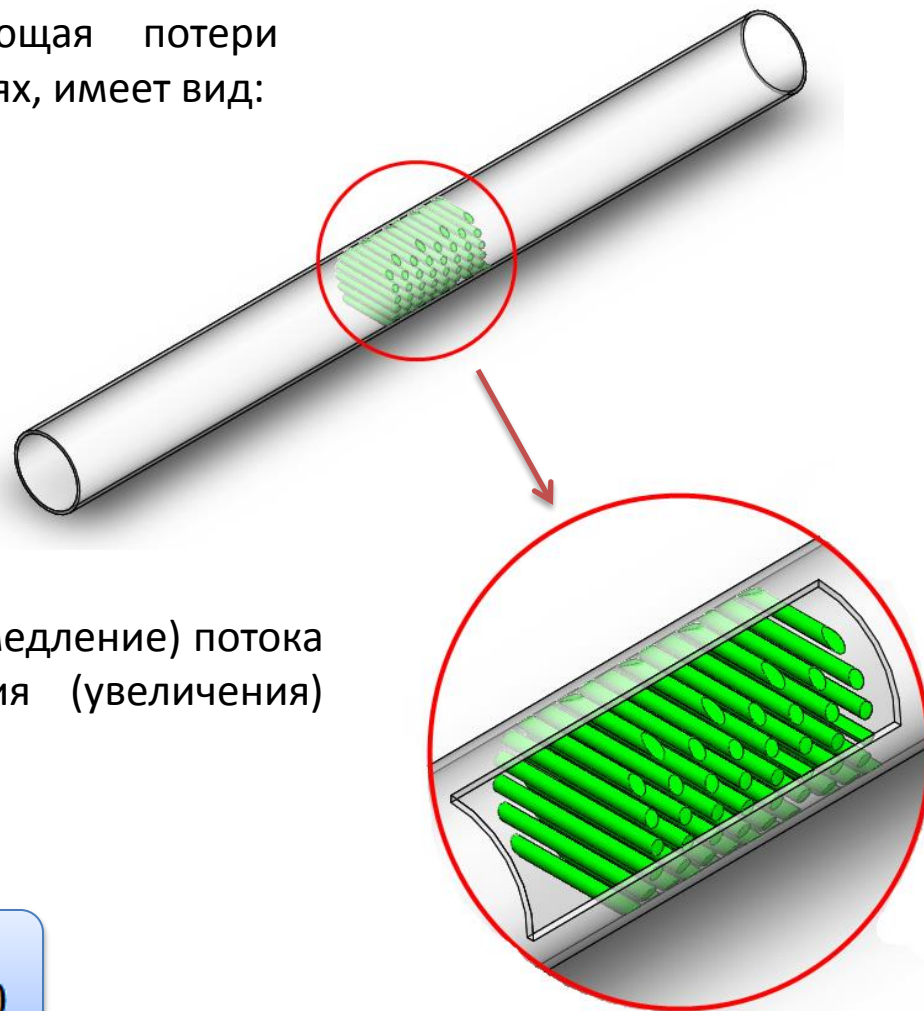
Из справочника по гидравлическим сопротивлениям* для данного случая имеем следующее выражение:

$$\xi = \psi A Re_{\text{ср}}^{-0.27} (z_p + 1) + \Delta \xi_t$$

$\Delta \xi_t$ – учет потери давления на ускорение (замедление) потока в пределах пучка вследствие уменьшения (увеличения) плотности рабочей среды.

$$\Delta \xi_t = \frac{T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}}}{T_{\text{ср}}}$$

Для данной задачи температуру можно считать постоянной, тогда: $\Delta \xi_t = 0$



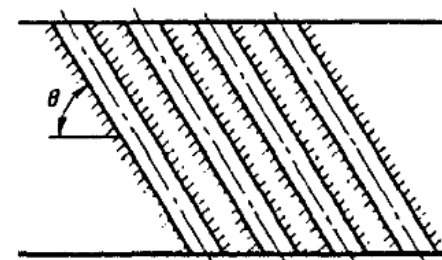
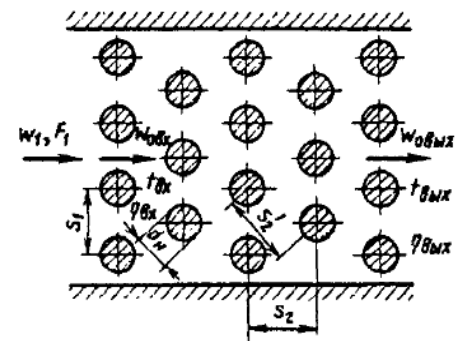
Моделирование пористой среды с помощью определения коэффициента гидравлического сопротивления ξ

Коэффициент гидравлического сопротивления*:

$$\xi = \psi A Re_{cp}^{-0.27} (z_p + 1) \approx 40.23 Re_{cp}^{-0.27}$$

Геометрические параметры решетки:

Диаметр трубок	$d_H = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Шаг между трубками перпендикулярно потоку:	$S_1 = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Шаг между трубками по потоку:	$S_2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Число поперечных рядов труб в пучке:	$z_p = 8$
Максимальное расстояние до соседней трубки	$S'_2 = \sqrt{0.25 \cdot S_1^2 + S_2^2} \approx 5.29 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Относительный шаг решетки:	$\bar{s} = \frac{S_1 - d_H}{S'_2 - d_H} \approx 0.36$



ψ – коэффициент, зависящий
от угла наклона трубок к
потоку θ

θ	30	45	60	90
ψ	0.34	0.57	0.80	1.0

$$A = 3.2 + 0.66(1.7 - \bar{s}) + (13.1 - 9.1S_1/d_H)(0.8 + 0.2 \cdot (1.7 - \bar{s})) \approx 4.47$$

Моделирование пористой среды с помощью определения коэффициента гидравлического сопротивления ξ

Преобразуем формулу Вейсбаха к виду:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \rho = (0,5\xi\rho|V|) \cdot \bar{V}$$

Чтобы получить градиент давления, разделим правую и левую часть на длину участка сопротивления:

$$\frac{\Delta P}{l_{\text{реш}}} = \left(\frac{0,5\xi\rho|V|}{l_{\text{реш}}} \right) \cdot \bar{V} = k\bar{V}$$

Для данной задачи коэффициент k равен:

$$k = \frac{0,5(40.23 \cdot Re_{\text{ср}}^{-0.27})\rho|V|}{l_{\text{реш}}} = \frac{20.115 \cdot Re_{\text{ср}}^{-0.27} \cdot \rho|V|}{l_{\text{реш}}}$$

Моделирование пористой среды с помощью определения коэффициента гидравлического сопротивления ξ

Порядок подготовки проекта:

1. Создаем объем для задания в нем сопротивления пористой среды
2. В заданном объеме определяем среднее число Рейнольдса
3. Создаем пользовательскую переменную k – коэффициент сопротивления
4. Создаем модификатор Сопротивление и задаем ему необходимые свойства

Свойства вещества

Вещество: Воздух

Агрегатное состояние: газ

Свойства вещества:

Библиотека веществ FlowVision

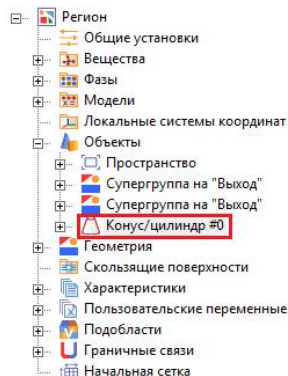
Параметры трубы:

Длина трубы: 0.3 м

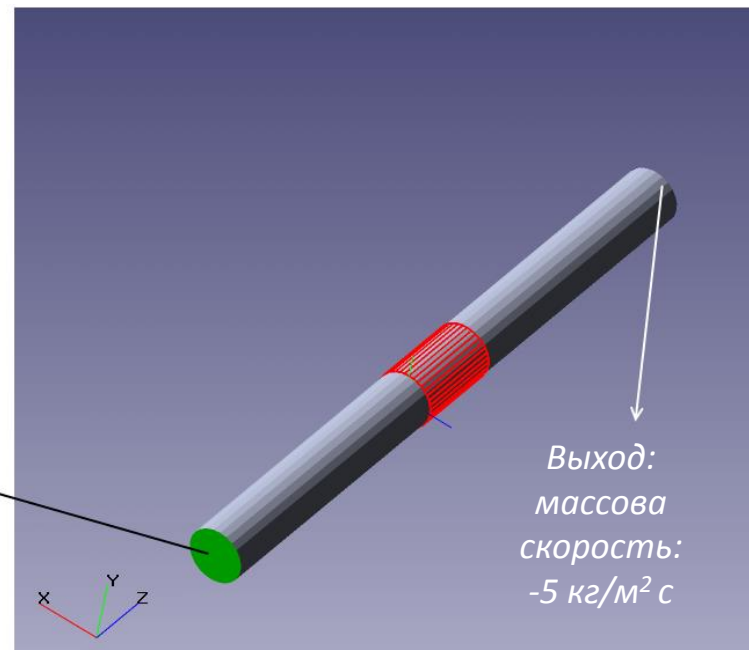
Диаметр трубы: 0.025 м

Длина участка
фильтрации : 0.04 м

1. Создаем объект



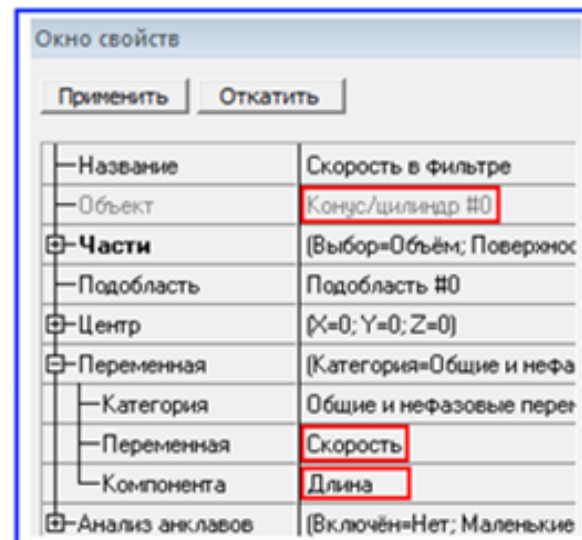
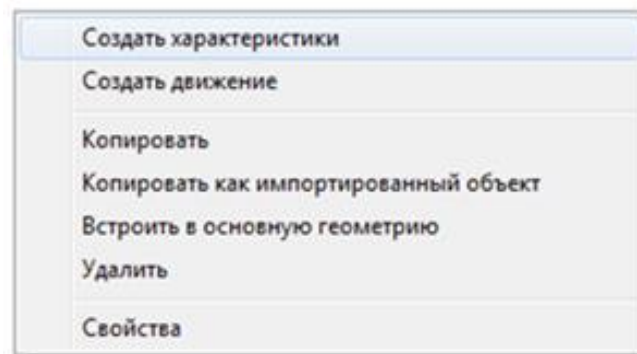
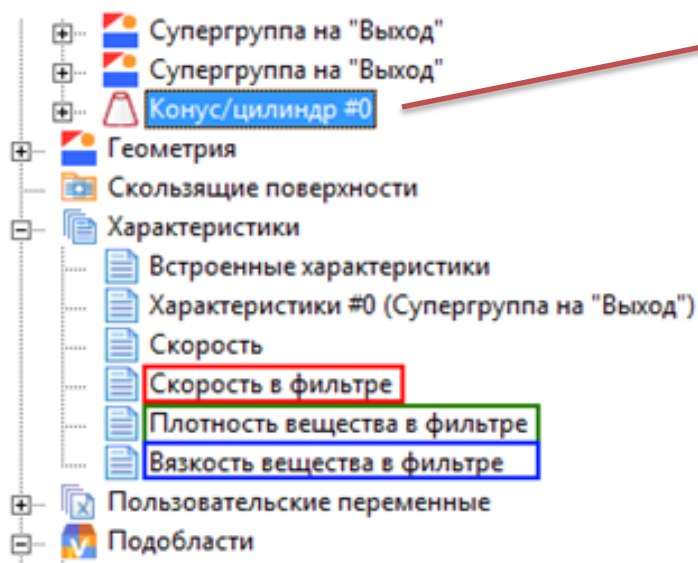
Вход:
массовая
скорость:
 $5 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$



Выход:
массовая
скорость:
 $-5 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$

Моделирование пористой среды с помощью определения коэффициента гидравлического сопротивления ξ

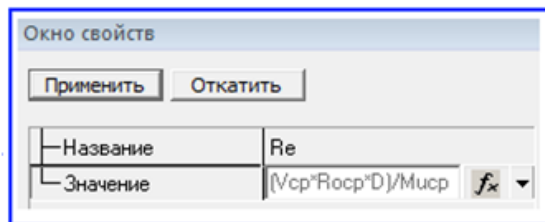
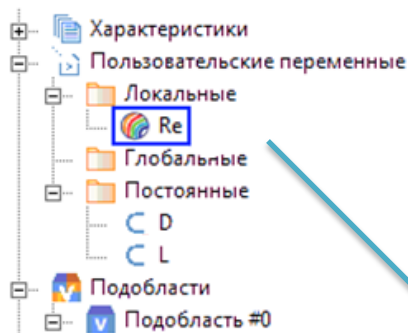
2. 1 Для определения среднего по объему пористой среды числа Рейнольдса создаем характеристики на объекте: Скорость, Плотность, Вязкость



По аналогии создаем характеристики
плотность и вязкость

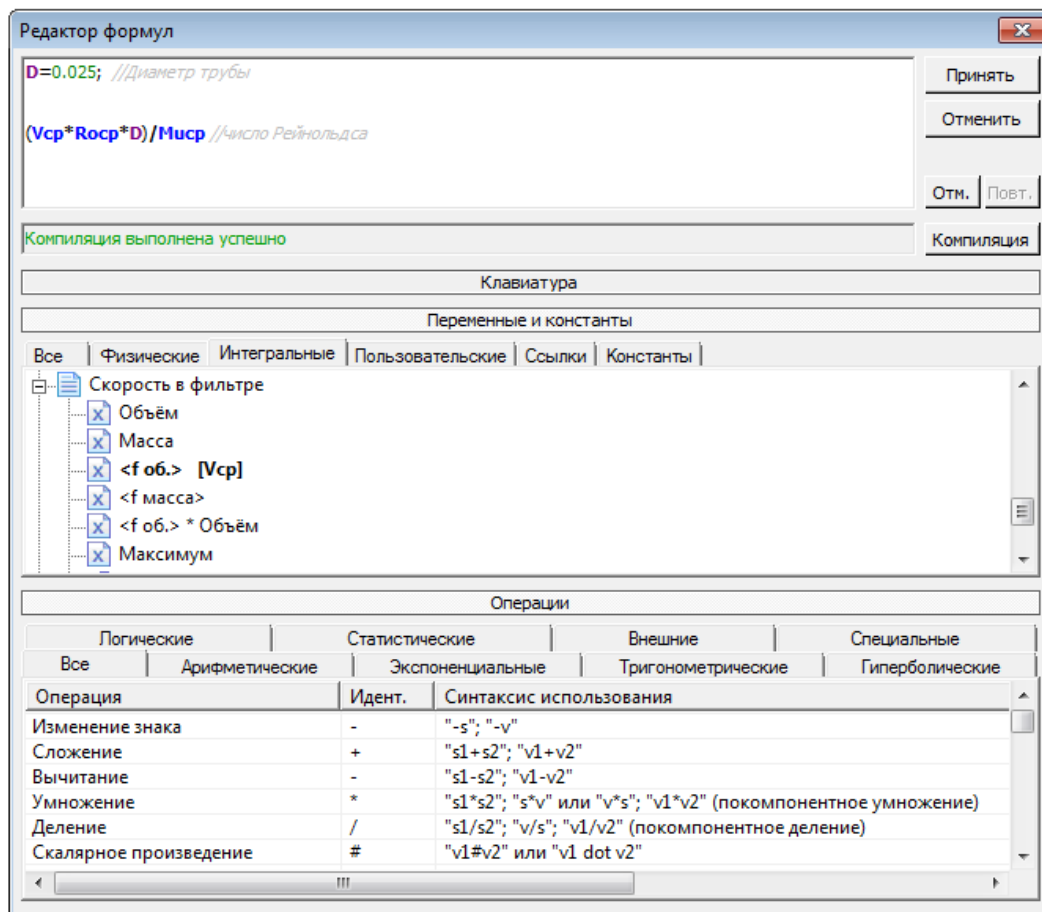
Моделирование пористой среды с помощью определения коэффициента гидравлического сопротивления ξ

2.2 Создаем локальную пользовательскую переменную Re для определения среднего числа Рейнольдса



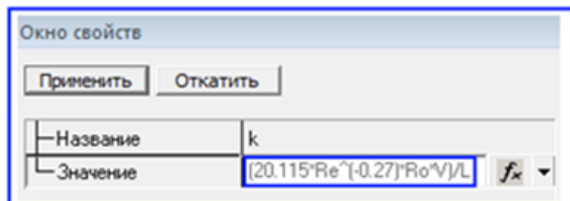
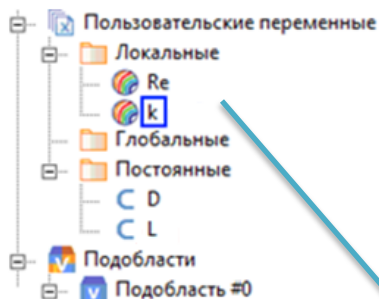
V_{cp} – средняя скорость в объеме модификатора; R_{ocp} – средняя плотность в объеме модификатора; μ_{cp} – средняя вязкость в объеме модификатора.

V_{cp} , R_{ocp} , μ_{cp} средние величины, вычисляемые с помощью созданных пользователем Характеристики в объеме модификатора. Созданные в Препроцессоре Характеристики доступны в редакторе формул.

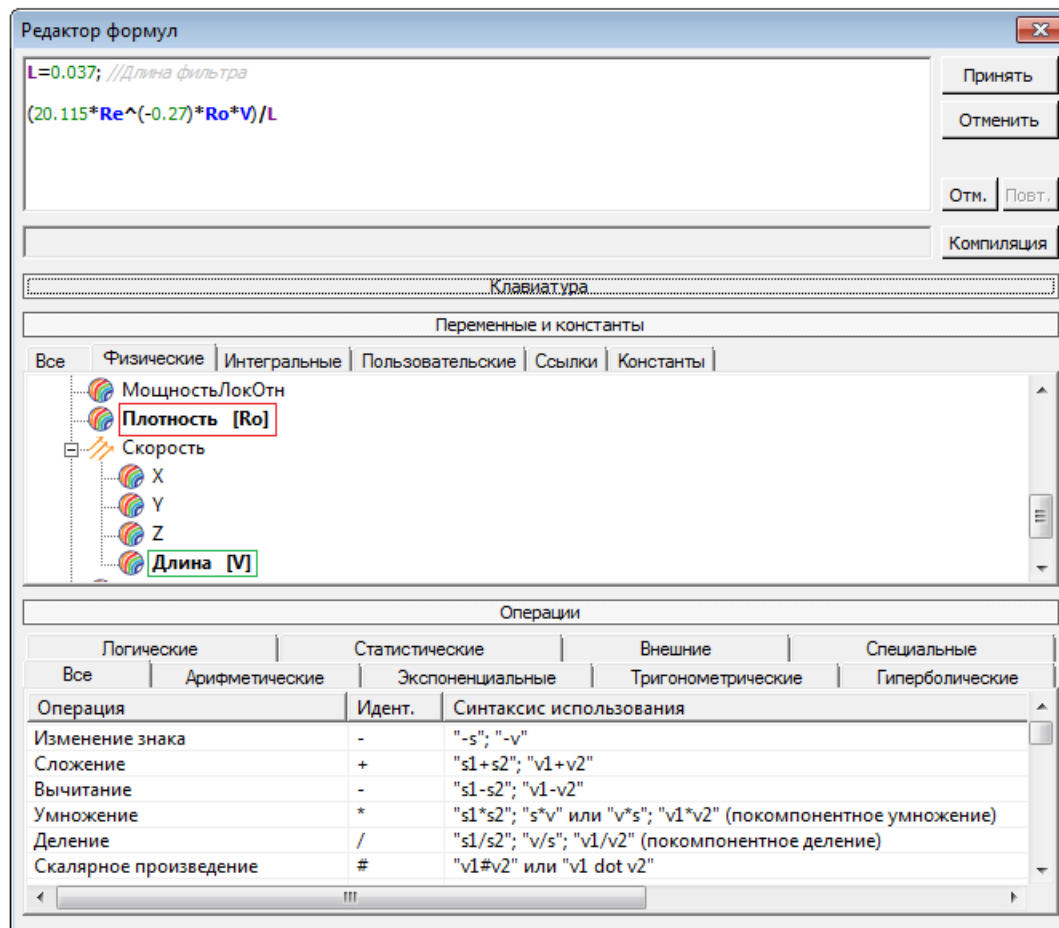


Моделирование пористой среды с помощью определения коэффициента гидравлического сопротивления ξ

3 Создаем локальную пользовательскую переменную k

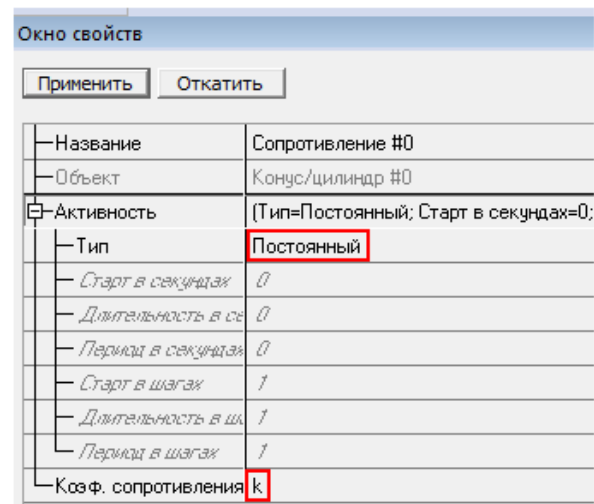
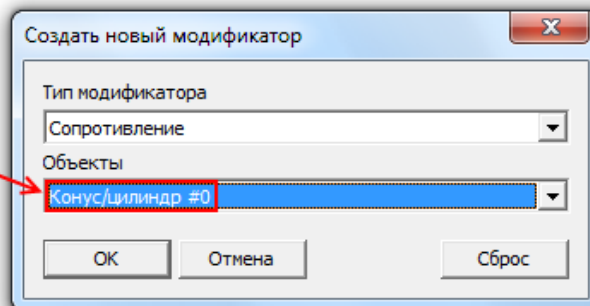
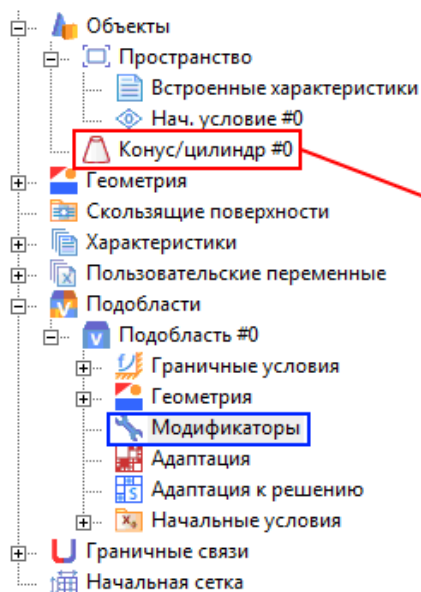


$$k = \frac{0,5(40.23 \cdot Re_{cp}^{-0.27})\rho|V|}{l_{реш}} = \frac{20.115 \cdot Re_{cp}^{-0.27} \cdot \rho|V|}{l_{реш}}$$



Моделирование пористой среды с помощью определения коэффициента гидравлического сопротивления ξ

4. Создаем модификатор Сопротивление, в качестве коэффициента сопротивления задаем пользовательскую переменную k



Моделирование пористой среды с помощью определения коэффициента гидравлического сопротивления ξ

Результат расчета:

