



Моделирование систем тел с пневматическими элементами

Содержание

31. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕЛ С ПНЕВМАТИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ.....	31-4
31.1. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ.....	31-4
31.2. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ.....	31-6
31.2.1. Камеры.....	31-6
31.2.2. Камеры постоянного объема.....	31-6
31.2.3. Пневморессоры.....	31-7
31.2.3.1. Табличная модель пневморессоры.....	31-8
31.2.3.1.1. Параметры пневморессоры в UM Input.....	31-8
31.2.3.1.2. Формат табличных данных.....	31-9
31.2.3.1.3. Подготовка и ввод табличных данных.....	31-10
31.2.3.1.3.1. Оцифровка графиков.....	31-10
31.2.3.1.3.2. Подготовка данных в Microsoft Excel.....	31-10
31.2.3.1.3.3. Подготовка данных в текстовом файле.....	31-11
31.2.3.1.3.4. Создание файлов UM *.ast с табличными моделями пневморессор.....	31-12
31.2.3.1.3.5. Создание табличных данных по эффективной площади.....	31-15
31.2.3.1.4. Математическая модель пневморессоры при табличном описании.....	31-16
31.2.3.1.5. Верификация математической модели.....	31-19
31.2.4. Соединения (простые узлы).....	31-21
31.2.5. Пневматические каналы и трубки.....	31-21
31.2.5.1. Стационарные модели пневмотрубок.....	31-21
31.2.5.1.1. Модель массового расхода "Atlas".....	31-21
31.2.5.1.2. Модель массового расхода "Механика жидкости".....	31-22
31.2.5.1.3. Уравнение Дарси-Вайсбаха.....	31-23
31.2.5.1.4. Сравнение моделей.....	31-24
31.2.5.2. Динамическая модель пневмотрубки.....	31-25
31.2.5.2.1. Математическая модель.....	31-26
31.2.5.2.2. Верификация динамической модели.....	31-27
31.2.6. Отверстия.....	31-32
31.2.6.1. Сопло.....	31-32
31.2.6.2. ISO 6358.....	31-33
31.2.6.3. Сравнение моделей отверстия.....	31-33
31.2.7. Пневмораспределители (клапаны).....	31-35
31.2.7.1. Клапан контроля высоты (HCV, LV).....	31-35
31.2.7.1.1. Характеристика клапана HCV.....	31-37
31.2.7.1.2. Математическая модель HCV.....	31-38
31.2.7.1.3. Создание файла UM *.hcv с моделью клапана HCV.....	31-38
31.2.7.2. Клапан регулировки перепада давления (DPCV).....	31-41
31.2.7.3. Невозвратный клапан.....	31-42
31.2.8. Компрессоры.....	31-43
31.3. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	31-45
31.3.1. Параметры табличных пневморессор.....	31-45
31.3.2. Описание пневматических систем.....	31-48
31.3.2.1. Список пневмосистем.....	31-48
31.3.2.2. Описание пневматической системы.....	31-49
31.3.2.2.1. Общие параметры пневмосистемы.....	31-49
31.3.2.2.2. Список камер с постоянным объемом.....	31-50
31.3.2.2.3. Список каналов (пневмотрубок).....	31-50
31.3.2.2.4. Список отверстий.....	31-52
31.3.2.2.5. Список клапанов HCV.....	31-52
31.3.2.2.6. Список компрессоров.....	31-54
31.3.2.3. Инструмент для тестирования моделей пневмотрубок и отверстий.....	31-55
31.3.2.3.1. Стационарные модели каналов (пневмотрубок).....	31-55
31.3.2.3.2. Модели отверстий.....	31-56
31.3.2.3.3. Инструмент для тестирования динамической модели трубки.....	31-56

31.3.2.4. Список переменных для пневматических элементов	31-59
31.3.3. Общие настройки моделирования пневмосистем	31-60
31.3.4. Расчет начальных давлений для моделей с клапанами HCV	31-62
31.3.4.1. Расчет начальных давлений для автомобильных моделей	31-63
31.3.4.2. Расчет начальных давлений для железнодорожных моделей	31-64
31.4. ТЕСТЫ И ПРИМЕРЫ	31-65
31.4.1. Зарядка и разрядка баков	31-65
31.4.1.1. Тест 1: Разрядка	31-65
31.4.1.2. Тест 2: Зарядка и разрядка	31-67
31.4.2. Динамическая жесткость и демпфирование	31-69
31.4.2.1. Тест 1: Пневморессора, соединенная трубкой со вспомогательным резервуаром	31-69
31.4.2.2. Тест 2: Пневморессора, соединенная отверстием со вспомогательным резервуаром	31-76
31.4.3. Модели с пневморессорами	31-78
31.4.3.1. Испытательный стенд с тремя пневморессорами	31-78
31.4.3.2. Испытательный стенд с шестью пневморессорами	31-82
31.4.3.3. Тестовая модель: высокоскоростной моторный вагон	31-86
31.4.4. Модель стенда с клапаном HCV	31-88
31.4.4.1. Добавление тел, шарниров и силовых элементов в модель стенда	31-88
31.4.4.2. Модель пневмосистемы	31-91
31.4.4.3. Создание переменной – угол поворота рычага	31-92
31.4.4.4. Динамические тесты с клапаном HCV	31-93
31.4.4.4.1. Общая информация о тестах	31-93
31.4.4.4.2. Тесты с управлением	31-94
31.4.4.4.3. Тест с расчетом начальных условий по давлениям и координатам	31-97
31.5. СООБЩЕНИЯ ОБ ОШИБКАХ	31-99
31.5.1. Ошибки создания моделей пневмосистем	31-99
31.5.2. Ошибки процесса моделирования	31-100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	31-101

31. Моделирование систем тел с пневматическими элементами

31.1. Общая информация

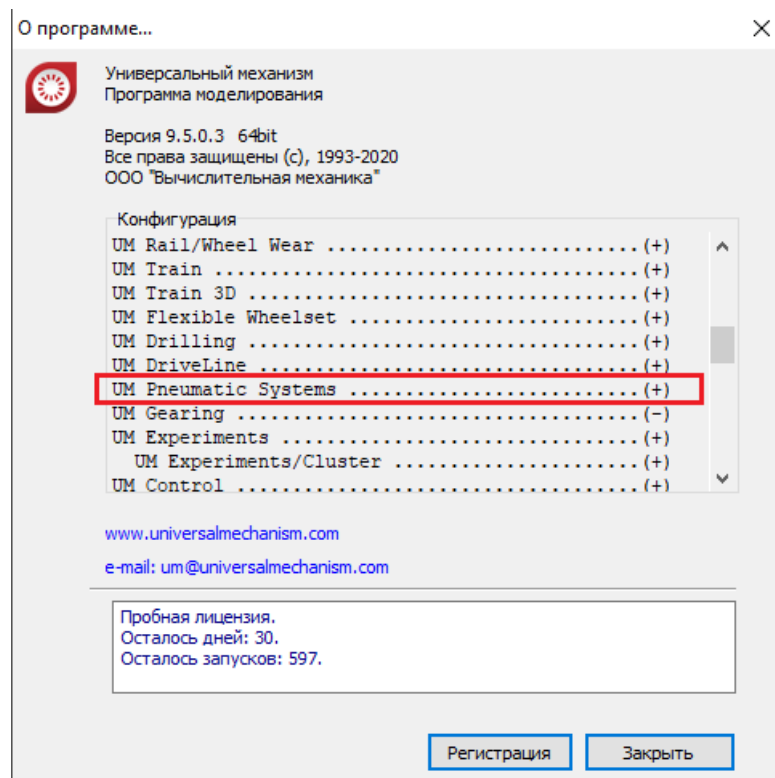


Рис. 31.1. Окно "О программе". Список доступных модулей

Программа "Универсальный механизм" включает специальный модуль **UM Pneumatic Systems** (UM PS), который содержит инструменты для моделирования систем с пневматическими элементами, рис. 31.1. В модуле доступны следующие элементы:

- пневматические рессоры;
- камеры с постоянным объемом;
- пневматические трубки и каналы;
- отверстия, сопла;
- соединения трубок;
- клапаны контроля высоты;
- клапаны регулировки перепада давления (DPCV)
- компрессоры.

Замечание. Модель, использующая моделирование пневмосистемы (п. 31.3), должна включать по крайней мере один силовой элемент типа табличной пневморессоры, п.31.2.3.1.

В данном руководстве мы используем следующие обозначения:

p - давление (Па);

V - объем (м^3);

T - температура (К);

$R = 287.058$ - удельная газовая постоянная ($\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$);

n - индекс политропы;

m - масса (кг);

d, D - диаметр отверстия, трубки (м, мм);

A - площадь (м^2);

L - длина (м).

Стандартные атмосферные условия (Standard Reference Atmospheric conditions, ANR):

$$p_0 = 101.325 \text{ кПа}, \tag{31.1}$$

$$T_0 = 293.15 \text{ К} = 20^\circ\text{C},$$

$$RH_0 = 65\% \text{ (относительная влажность).}$$

Воздух рассматривается как идеальный газ, удовлетворяющий закону

$$pV = mRT. \tag{31.2}$$

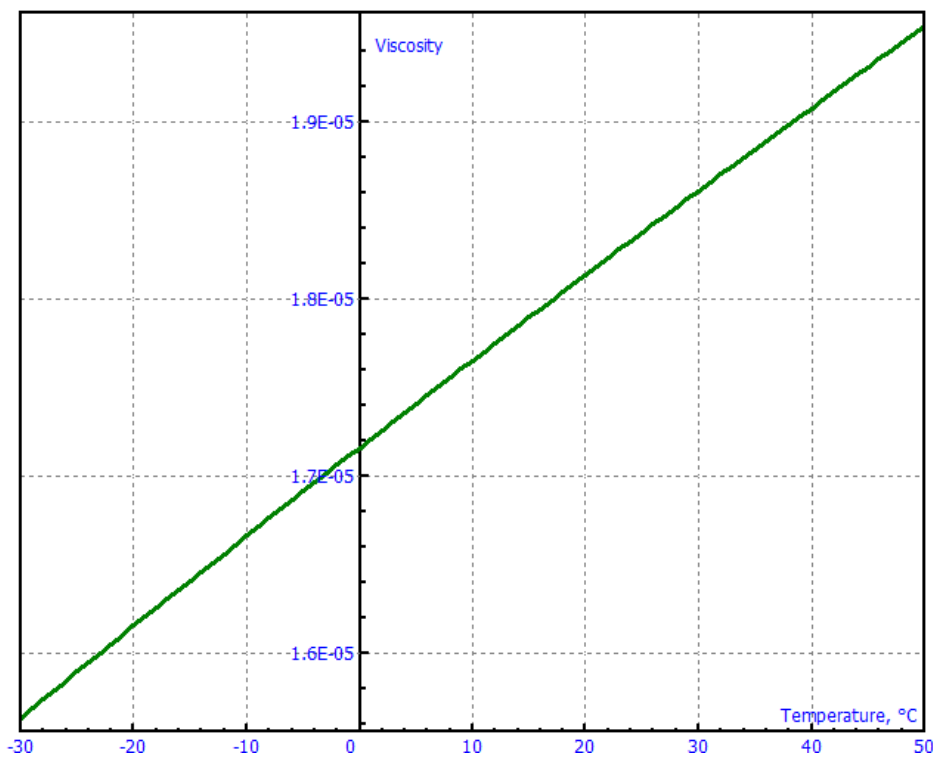


Рис. 31.2. Зависимость динамической вязкости воздуха от температуры

Зависимость динамической вязкости воздуха от температуры определяется законом Сазерленда, рис. 31.2, [1]:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_{ref} + S}{T + S} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/2}, \tag{31.3}$$

Здесь $\mu_0 = 1.716 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $T_{ref} = 273,15 \text{ К}$, постоянная Сазерленда $S = 110.4 \text{ К}$.

31.2. Пневматические элементы

Здесь мы рассматриваем пневматические элементы, которые включены в модуль UM Pneumatic Systems.

31.2.1. Камеры

Состояние воздуха в камере описывается уравнением политропного термодинамического процесса

$$p \left(\frac{V}{m} \right)^n = c = \text{const.} \quad (31.4)$$

Давление p предполагается одинаковым по всему объему камеры, V - объем камеры, n - индекс политропы.

Масса воздуха в камере может быть переменной и рассчитывается по формуле

$$m = m_0 + \sum_i \int_0^t \dot{m}_i dt,$$

где \dot{m}_i - массовый расход потока через соединенную с ним трубку или отверстие, пп. 31.2.5 *Пневматические каналы и трубки*, 31.2.6 *Отверстия*.

С учетом закона идеального газа (31.2) температура определяется из соотношения

$$T = \frac{pV}{mR}.$$

31.2.2. Камеры постоянного объема

Элемент соответствует камере с недеформируемыми стенками, объем которой постоянен $V = \text{const}$, а масса переменная. Давление в камере рассчитывается непосредственно из уравнения политропного процесса (31.4)

$$p = cm^n V^{-n}.$$

31.2.3. Пневморессоры

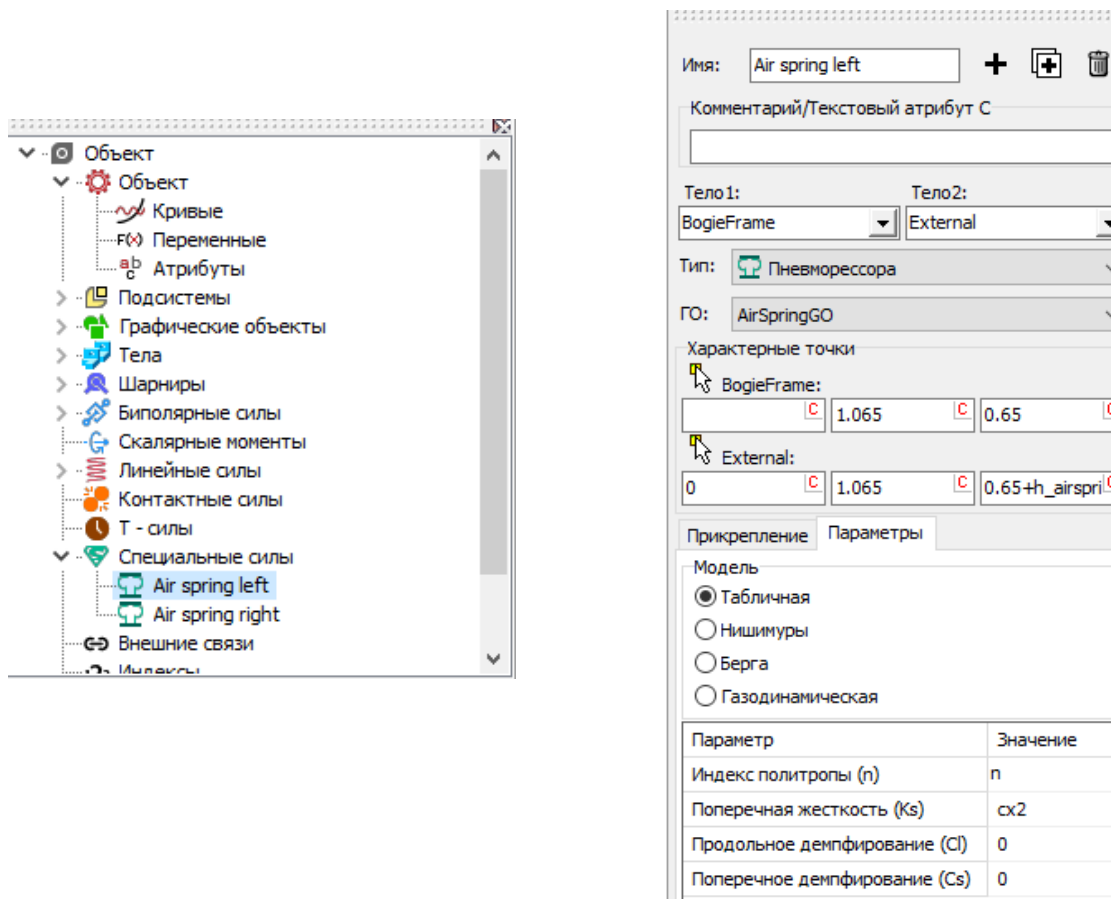


Рис. 31.3. Пневморессора как специальный силовой элемент

UM Pneumatic Systems включает несколько моделей пневморессор (ПР) в виде специальных силовых элементов, рис. 31.3. Реализованы следующие модели ПР:

- **Табличная модель:** описание силового элемента включает табулированные экспериментальные данные о зависимости силы и объема от высоты при различных давлениях; эта модель является наиболее точной
- Модель Нишимуры
- Модель Берга
- Газодинамическая модель

Важно, что только табличная модель может быть включена пневмосистему. В частности, она может быть связана пневмотрубками или отверстиями с другими элементами пневмосистемы. Остальные модели ПР являются независимыми в том смысле, что состояние отдельной ПР не зависит от других ПР или элементов пневмосистем.

31.2.3.1. Табличная модель пневморессоры

Производители часто предоставляют информацию о свойствах ПР в виде статических диаграмм, которые включают зависимости силы и объема от высоты. Примеры таких диаграмм для ПР 1T15-M0 [2] и Numatics ASNS10-2-1 [3] приведены на рис. 31.4. Такие данные позволяют развить весьма точные математические модели ПР, как это будет показано ниже.

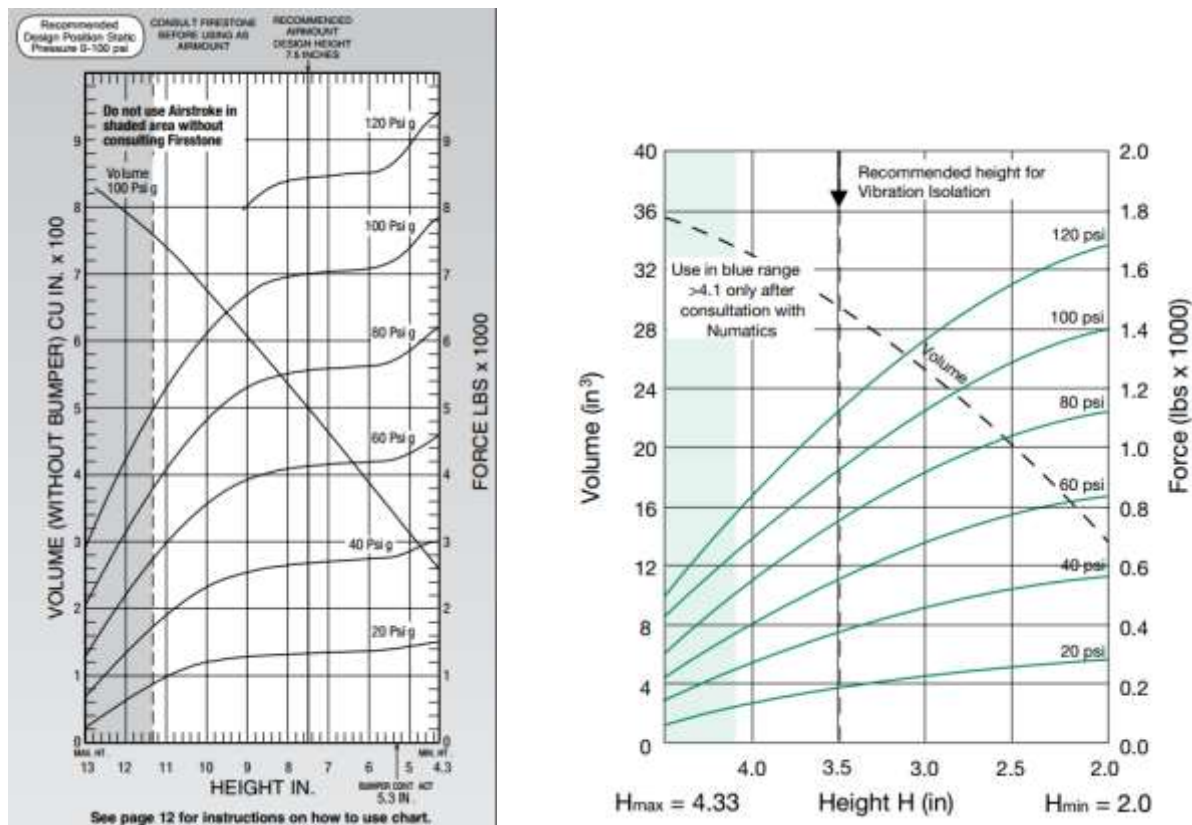


Рис. 31.4. Зависимость силы и объема от высоты 1T15-M0 and Numatics ASNS10-2-1

31.2.3.1.1. Параметры пневморессоры в UM Input

Задание табличной ПР в программе ввода включает следующие параметры (рис. 31.3):

- индекс политропы; рекомендуемое значение для ПР $n=1.38$, см. [4], [5];
- коэффициенты жесткости и демпфирования в поперечном направлении, а также коэффициент демпфирования в продольном направлении для изолированной ПР.

Эти данные могут быть параметризованы идентификаторами.

Таблицы описания ПР вводятся в программе моделирования UM Simulation, п.

31.2.3.1.3.4. Создание файлов UM *.ast с табличными моделями пневморессор.

31.2.3.1.2. Формат табличных данных

H \ P	20	40	60	80	100
9.5	2537.2	4782.7	7035	9410.5	11966
10	2385.2	4553.9	6792.5	9140.6	11579
10.5	2246.8	4467.6	6677.4	8966.7	11346
11	2233.1	4379.9	6511.6	8733.8	11061
11.5	2194.7	4251.1	6336.3	8498.1	10775
12	2119.4	4134.7	6165	8274.8	10496
12.5	2048.2	4019.6	6025.3	8106.3	10276
13	1983.8	3936	5929.4	8004.9	10128
13.5	1938.6	3886.7	5880	7951.5	10059
14	1898.8	3862	5859.5	7922.7	10027
14.5	1886.5	3851.1	5832.1	7900.8	10006
15	1874.2	3845.6	5819.8	7876.1	9984.6
15.5	1870.1	3827.8	5804.7	7869.3	9957.2
16	1863.2	3812.7	5788.3	7850.1	9947.6

a)

Сила

H \ P	20	40	60	80	100
9.5	775.42	837.07	898.72	960.37	1022
10	809.67	879.54	949.41	1019.3	1089.2
10.5	905.57	967.22	1028.9	1090.5	1152.2
11	954.89	1022	1089.2	1156.3	1223.4
11.5	1007	1078.2	1149.4	1220.7	1291.9
12	1050.8	1126.1	1201.5	1276.8	1352.2
12.5	1098.7	1176.8	1254.9	1333	1411.1
13	1149.4	1228.9	1308.3	1387.8	1467.3
13.5	1219.3	1294.7	1370	1445.4	1520.7
14	1249.4	1331.6	1413.8	1496	1578.2
14.5	1304.2	1386.4	1468.6	1550.8	1633
15	1328.9	1419.3	1509.7	1600.2	1690.6
15.5	1390.6	1478.2	1565.9	1653.6	1741.3
16	1448.1	1534.4	1620.7	1707	1793.3

b)

Объем

H \ P	100
9.5	1022
10	1089.2
10.5	1152.2
11	1223.4
11.5	1291.9
12	1352.2
12.5	1411.1
13	1467.3
13.5	1520.7
14	1578.2
14.5	1633
15	1690.6
15.5	1741.3
16	1793.3

c)

Рис. 31.5. Табличные данные для ПР в Имперской системе единиц (фрагмент): сила (a) и объем (b,c)

Таблицы. Данный тип описания ПР требует две таблицы: сила/высота и объем/высота для различных значений давления, рис. 31.5. Данные должны быть упорядочены по росту высоты (H) и давления (P). Столбцы таблицы соответствуют давлению. Объем может быть задан для одного значения давления (рис. 31.5 c), в то время как описание силы должно соответствовать всему диапазону работы ПР.

Другие требования:

- Таблица для силы должна содержать как минимум данные для двух значений давления и двух - высоты.
- Значение силы должно расти с увеличением давления.
- Таблица объема должна как минимум содержать данные для одного давления и двух значений высоты.
- Значение объема должно увеличиваться с ростом как давления, так и высоты.

Единицы измерения. Данные могут быть подготовлены как в СИ, так и в Имперской системе, Таблица 1.

Таблица 1. Единицы измерения данных

Система единиц	Высота	Сила	Давление	Объем
СИ	м	Н	Па	м ³
Имерская	in	lbf	psi g, psi a	in ³

Тип давления. Могут использоваться как абсолютное, так и избыточное (манометрическое) давления.

31.2.3.1.3. Подготовка и ввод табличных данных

31.2.3.1.3.1. Оцифровка графиков

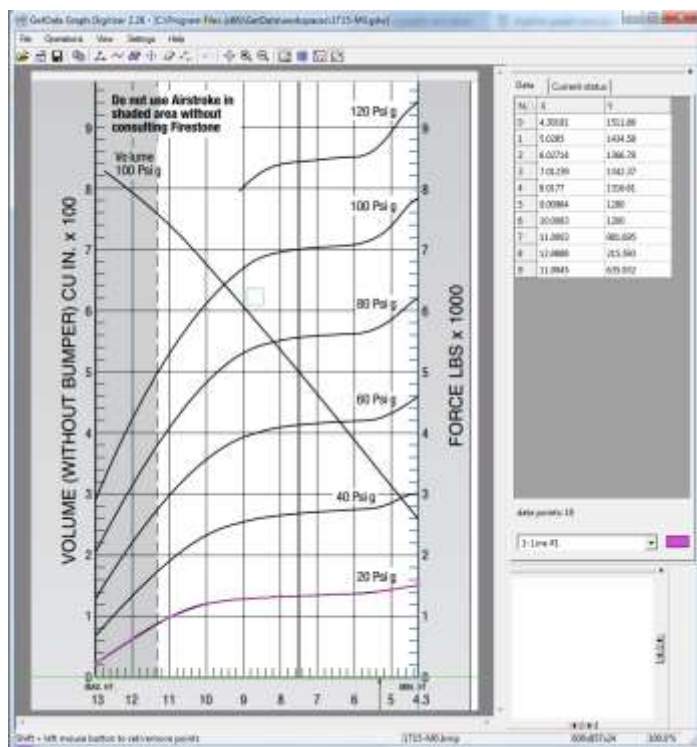


Рис. 31.6. Оцифровка графиков для ПР 1Т15-М0

Если описание ПР дано в виде графиков, наподобие изображенных на рис. 31.4, для перевода графиков в числовые данные могут быть использованы программы для оцифровки графиков. Мы используем российскую программу GetData Graph Digitizer, рис. 31.6, [6].

31.2.3.1.3.2. Подготовка данных в Microsoft Excel

Для подготовки табличных данных ПР в требуемом формате мы предлагаем использовать Microsoft Excel. С помощью этого инструмента легко изменить единицы измерения данных, например, литры следует конвертировать в м³, а бары в Па.

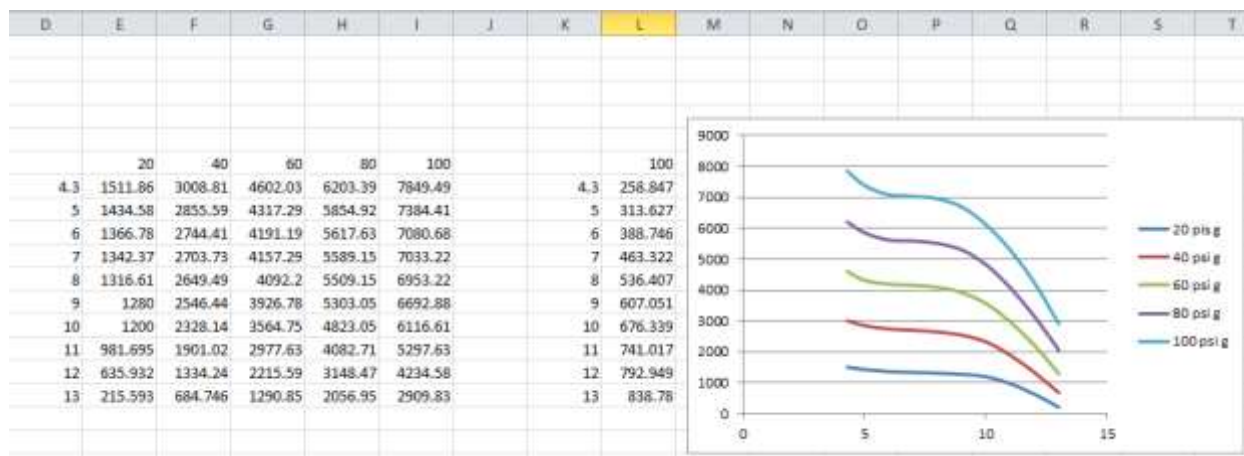


Рис. 31.7. Данные для ПР 1Т15-М0 в Microsoft Excel

31.2.3.1.3.3. Подготовка данных в текстовом файле

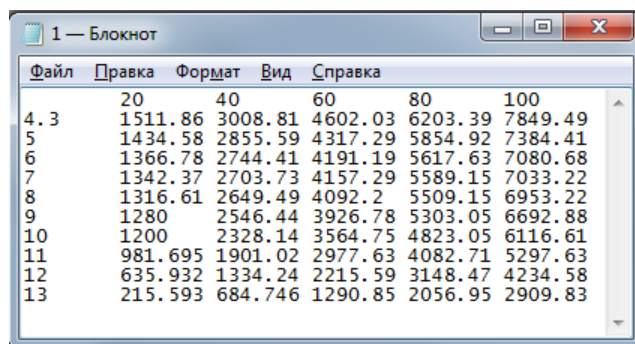


Рис. 31.8. Данные для ПР 1Т15-М0 в виде текста

Таблицы значений силы и объема могут быть подготовлены в редакторе текстов, рис. 31.8. Числа в строке следует отделять пробелами или символами табуляции.

31.2.3.1.3.4. Создание файлов UM *.ast с табличными моделями пневморес-сор

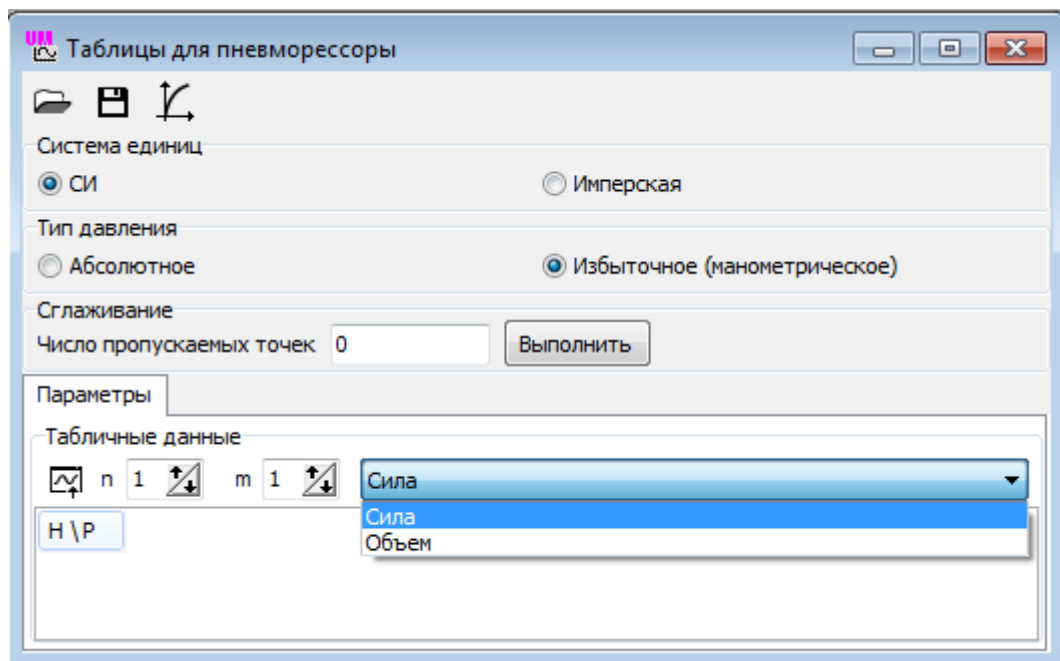



Рис. 31.9. Окно для создания табличной модели пневморесоры

Табличные данные для ПР должны быть сохранены в виде файла *.ast. По умолчанию эти файлы сохраняются в каталоге {Данные UM } \AirSpring, например,

c:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\2023\AirSpring\

Для создания файла

- Запустите программу UM;
- Используйте команду основного меню **Инструменты | Элементы пневмосистем | Таблицы для пневморесоры...** чтобы открыть окно *Таблицы для пневморесоры*, рис. 31.9;
- Если необходимо, измените
 - систему единиц
 - тип давления
- Выберите тип данных **Сила** или **Объем**
- Скопируйте таблицы из MS Excel или текстового редактора:
 - выделите данные, включая первую строку с давлениями, рис. 31.10;
 - скопируйте данные в буфер обмена Ctrl+C;
 - активируйте окно *Таблицы для пневморесоры* (рис. 31.9) щелчком мыши;
 - вставьте данные из буфера обмена командой Ctrl+V.
- После ввода, проверки и возможной модификации данных для силы и объема сохраните их в файл *.ast с помощью кнопки .

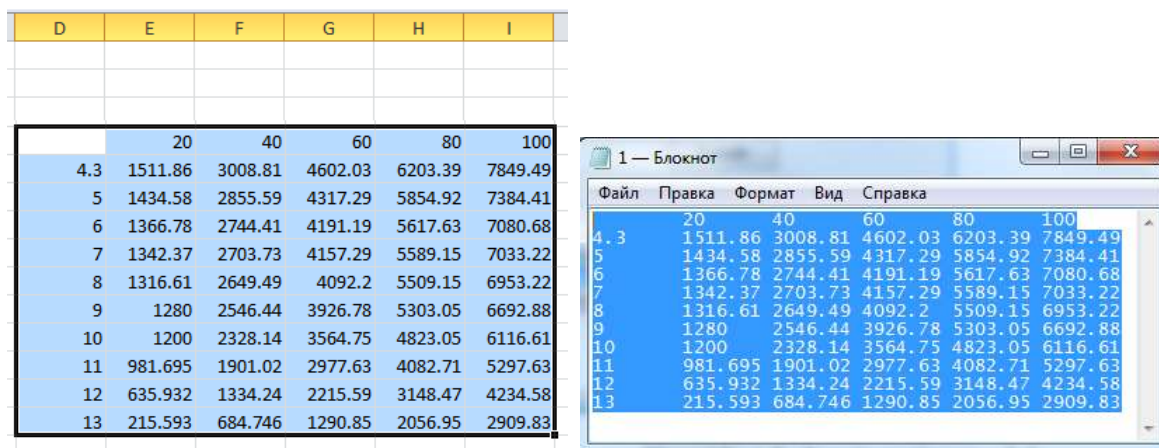


Рис. 31.10. Выделение данных в Microsoft Excel и текстовом редакторе

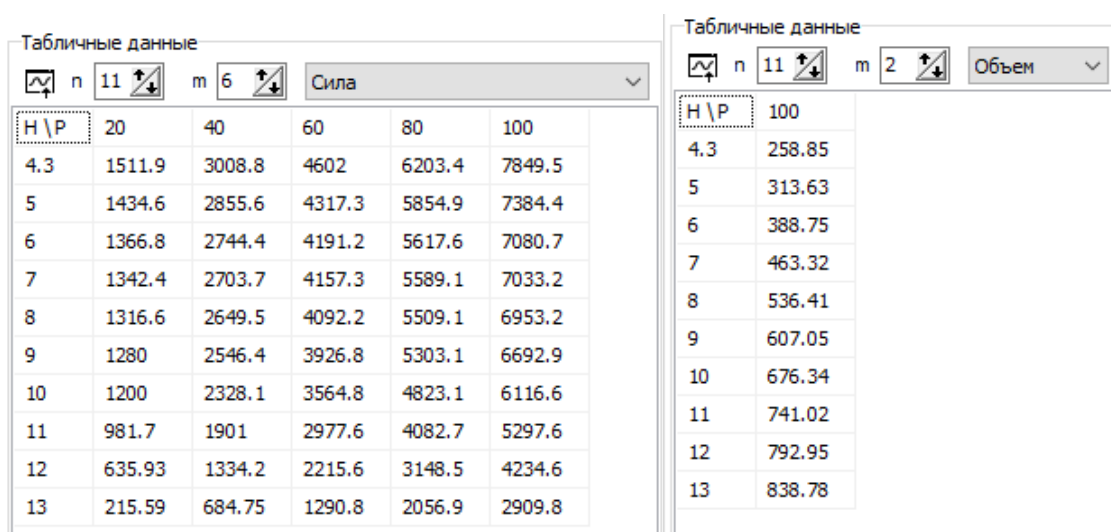


Рис. 31.11. Готовые данные для ПР 1Т15-М0 в имперской системе единиц

Сглаживание табличных данных

В группе **Сглаживание** щелкните на кнопку **Выполнить** (рис. 31.9) один или несколько раз для сглаживания данных в столбцах с использованием В-сплайна, рис. 31.12. Задайте ненулевое число пропускаемых точек для кардинального сглаживания экспериментальных данных.

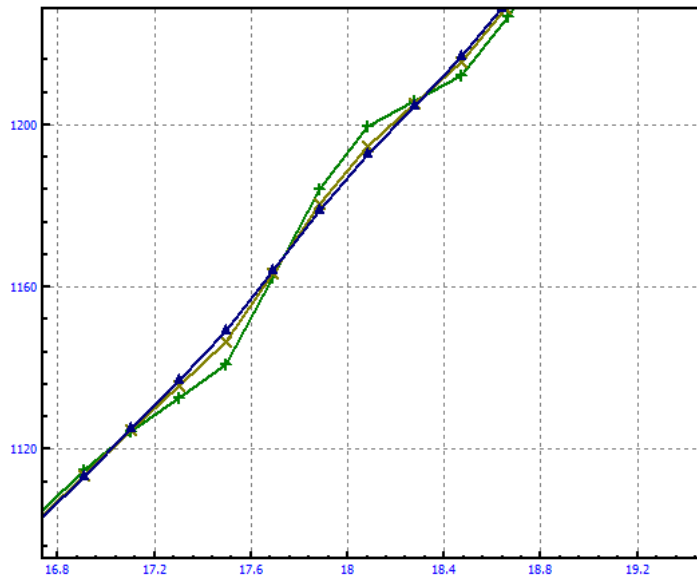


Рис. 31.12. Однократное и двукратное сглаживание данных

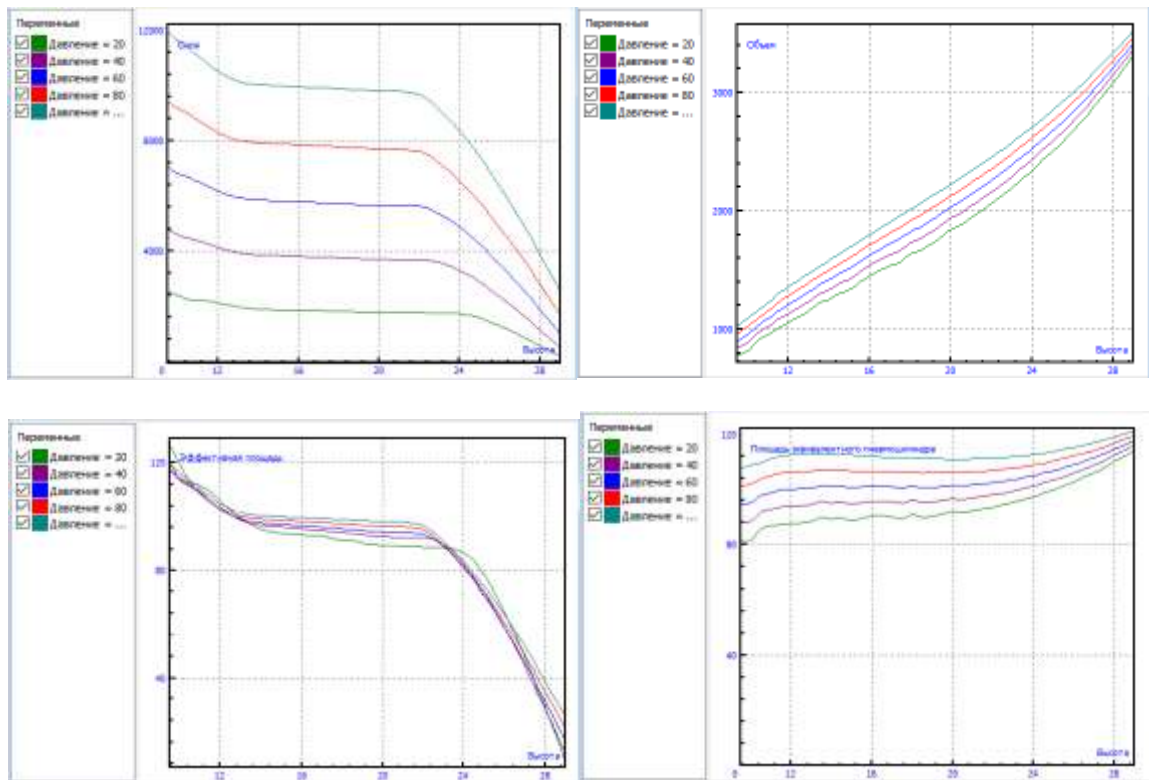




Рис. 31.13. Кривые для файла 'Test data.ast'

Отображение данных в виде кривых

Используйте кнопку  на рис. 31.9 to для получения графиков введенных данных (рис. 31.13)

- сила F ,
- объем V ,
- эффективная площадь $A = F/p$,
- площадь эквивалентного цилиндра $A_c = V/h$.

31.2.3.1.3.5. Создание табличных данных по эффективной площади

Описание ПР часто доступно в виде зависимости эффективной площади от высоты. Щелкните на кнопке  на рис. 31.9, чтобы открыть окно для создания табличной модели ПР по графикам зависимости эффективной площади и объема от высоты, рис. 31.14.

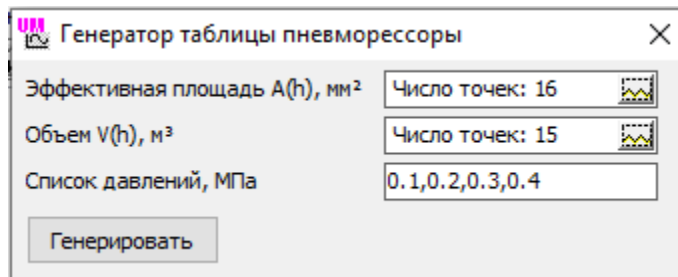



Рис. 31.14. Окно ввода кривых эффективной площади и объема

Как эффективная площадь, так и объем вводятся по щелчку на кнопке . Также следует задать список давлений для таблицы. Рис. 31.16 показывает кривые, соответствующие описанию свойств ПР в статье [7].

Поле ввода необходимых данных, к которым относятся

- кривая: зависимость эффективной площади от высоты,
- кривая: зависимость объема ПР от высоты,
- упорядоченный по возрастанию список давлений,

щелкните на кнопке **Генерировать** для создания таблиц силы и объема, рис. 31.17.

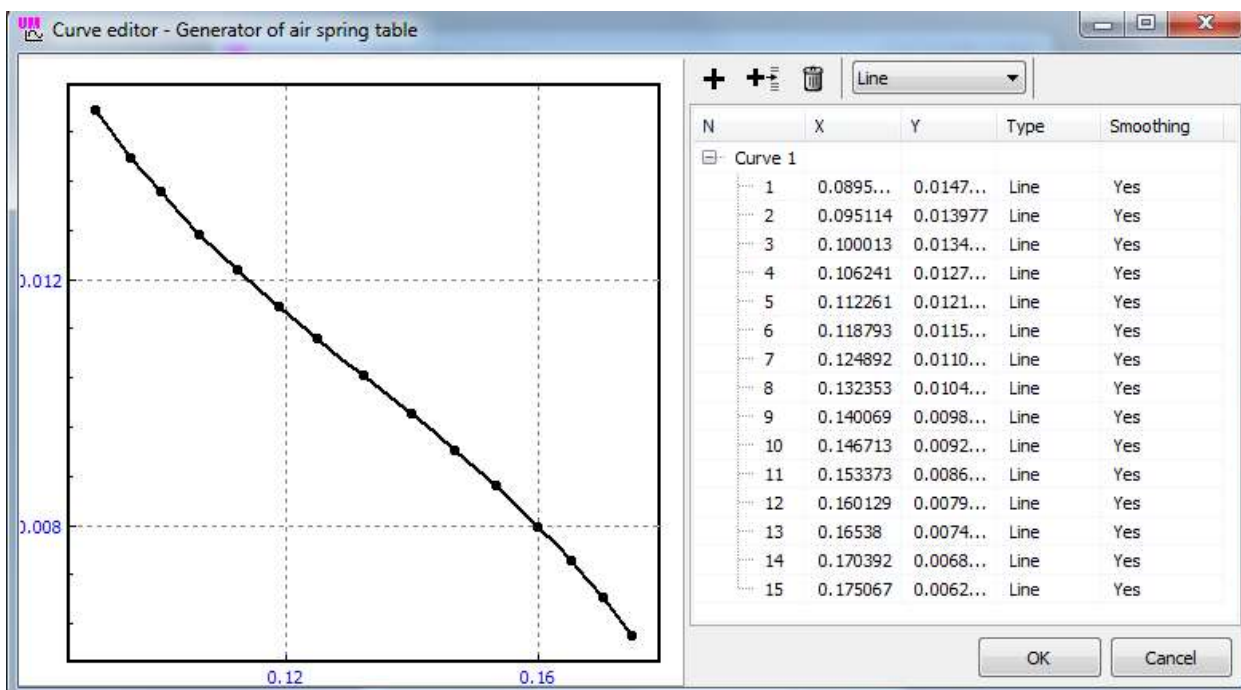


Рис. 31.15. Зависимость эффективной площади от высоты

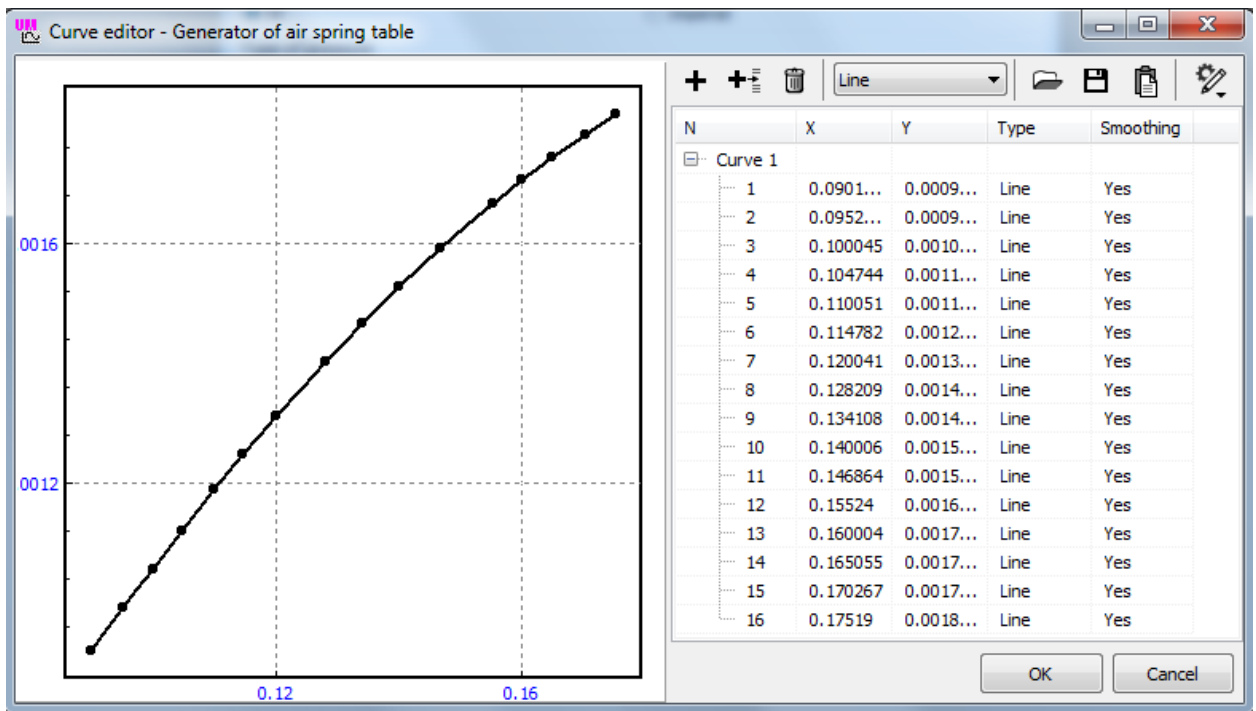


Рис. 31.16. Зависимость объема ПР от высоты

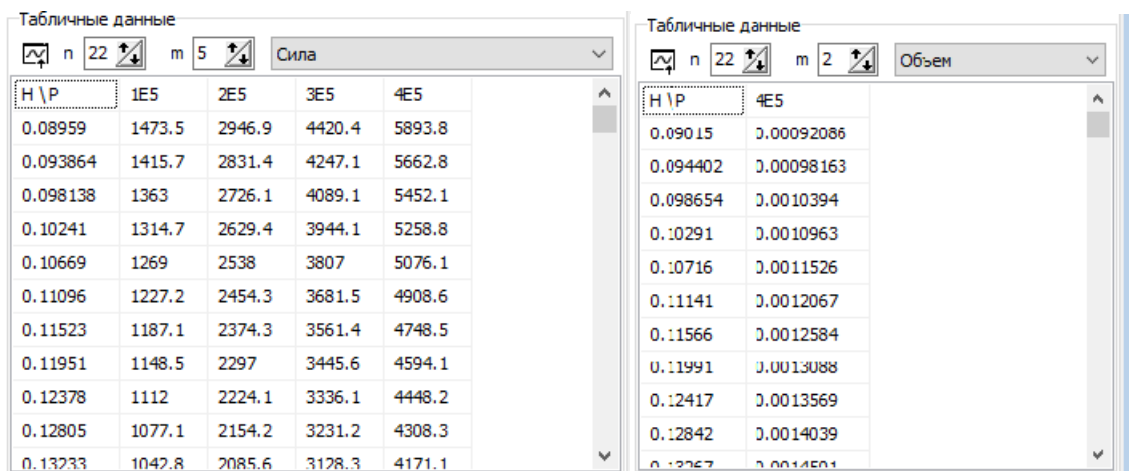


Рис. 31.17. Сгенерированные табличные данные

31.2.3.1.4. Математическая модель пневморессоры при табличном описании

Данная модель ПР использует экспериментальные **статические табличные данные** о зависимости силы F и объема V от высоты ПР h и давления воздуха внутри ПР p . Эти данные получаются при изобарическом (постоянное давление) нагружении ПР, рис. 31.13.

$$F_s = F_s(p, h), \quad V_s = V_s(p, h). \quad (31.5)$$

УМ использует как полиномиальную, в частности, линейную, так и сплайновую интерполяцию и экстраполяцию табличных данных для того, чтобы получить непрерывные функции (31.5) на всем диапазоне изменения высоты и давления.

Динамическая модель нагружения ПР - это зависимость силы, давления и объема от высоты в случае политропного сжатия и растяжения ПР при изменении ее высоты. Эта

модель рассчитывается для определенных значений статической нагрузки F_0 и высоты h_0 , которые обычно соответствуют положению равновесия объекта УМ. Масса воздуха внутри ПР считается постоянной, что соответствует модели **изолированной** ПР.

$$F_d = F_d(h, F_0, h_0), V_d = V_d(h, F_0, h_0), p_d = p_d(h, F_0, h_0). \quad (31.6)$$

Рассмотрим алгоритм расчета динамической характеристики ПР (31.6) по уравнениям (31.5).

- Рассчитать статическое давление p_0 из нелинейного уравнения, первого из уравнений системы (31.5): $F_0 = F_s(p, h_0)$.
- Рассчитать статический объем ПР из второго уравнения (31.5): $V_0 = V_s(p_0, h_0)$.
- Рассчитать статическую массу воздуха с использованием закона идеального газа при заданном значении температуры окружающей среды T_e : $m_0 = p_0 V_0 / (RT_e)$.
- Рассчитать политропную постоянную из уравнения (31.4): $c = p_0 \left(\frac{V_0}{m_0} \right)^n$.
- Для каждого значение высоты h определить V_d, p_d из системы двух нелинейных уравнений: политропного процесса (31.4) и второго уравнения Eq. (31.5). Рассчитать силы F_d из первого уравнения (31.5).

Этот алгоритм применяется также в случае *связанной* ПР, то есть соединенной с другими ПР и камерами пневматическими трубками и отверстиями. Единственное отличие состоит в том, что масса воздуха в объеме ПР является переменной и рассчитывается по формуле

$$m = m_0 + \sum_i \int_0^t \dot{m}_i dt,$$

где \dot{m}_i - массовый расход присоединенной трубки или отверстия i , пп. 31.2.5 *Пневматические каналы и трубки*, 31.2.6 *Отверстия*.

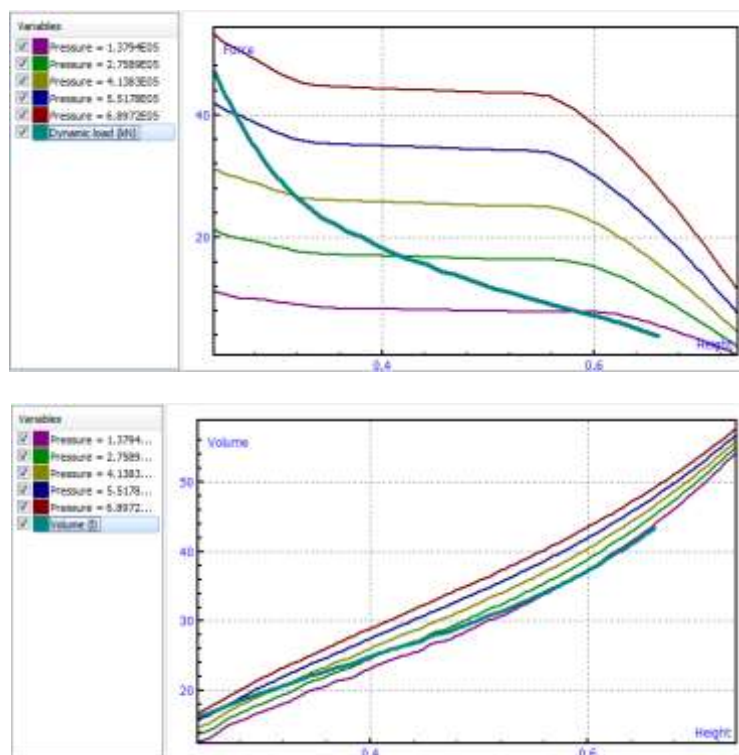


Рис. 31.18. Сила и объем при статическом и динамическом нагружении, файл "Test data.ast"

Зависимости силы и объема от высоты при статическом и динамическом нагружении ПР сравниваются на рис. 31.18. Графики для динамического нагружения соответствуют жирным кривым. Результаты получены для $n = 1.38$, $F_0 = 12\text{kH}$, $h_0 = 0.5\text{м}$.

Спецификации пневморессор часто содержат зависимость объема от высоты только для одного давления, рис. 31.7. В таких случаях используется упрощенная версия уравнений (31.5), в которой игнорируется зависимость объема от высоты:

$$F_s = F_s(p, h), \quad V_s = V_s(h). \tag{31.7}$$

Описанный выше алгоритм легко обобщается на этот упрощенный случай.

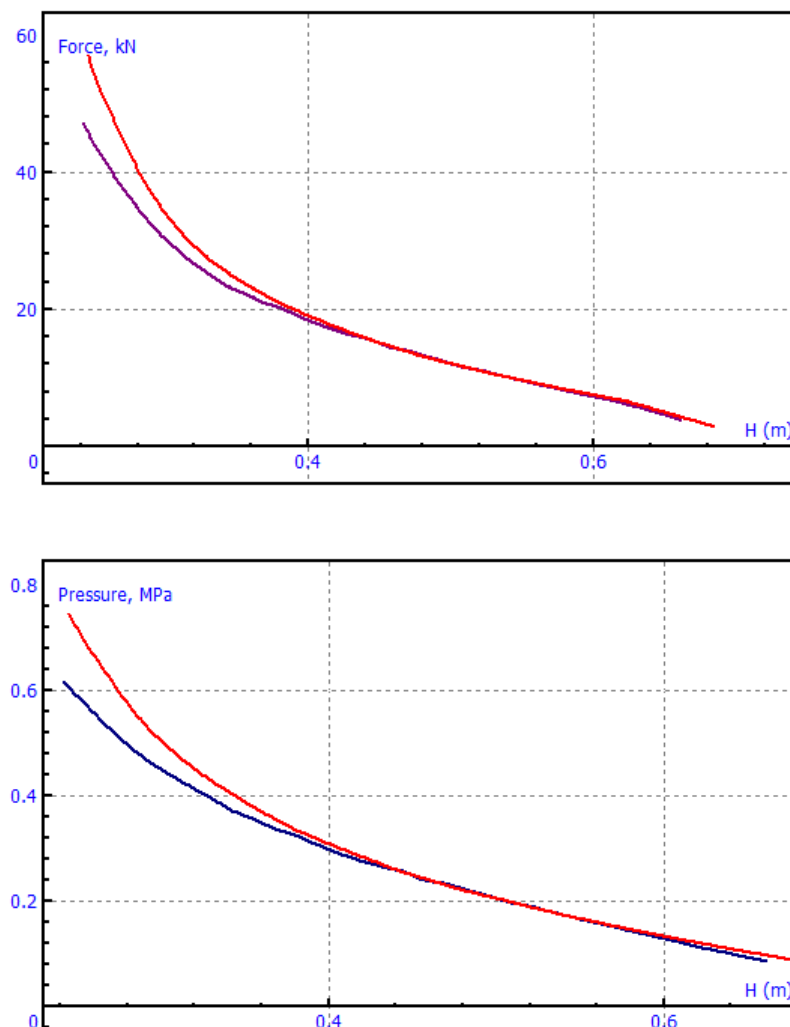


Рис. 31.19. Сравнение зависимостей силы и объема от высоты при динамическом нагружении: полная и упрощенная (красные кривые) модели

Решения для динамического нагружения табличной модели ПР (файл 'Test data.ast') с упрощенной моделью, в которой зависимости силы от высоты одни и те же, а для объема взята одна кривая при максимальном давлении (файл 'Test data 2.ast'), сравниваются на рис. 31.19. Этот пример показывает, что упрощенная модель имеет близкие результаты к полной модели в диапазоне высот, близком к статическому значению h_0 . Максимальное отклонение около 20% наблюдается при малых высотах ПР.

31.2.3.1.5. Верификация математической модели

Сравним математическую модель, описанную в предыдущем разделе, со стандартным инженерным расчетом динамического нагружения ПР в соответствии с [5], [4]. Рассмотрим ПР 1Т15-М0 в качестве примера. Динамическое нагружение на рис. 31.20 рассчитано в УМ в соответствии с описанным выше алгоритмом для статической нагрузки $F_0 = 18\text{кН}$ и статической высоты $h_0 = 0.2032\text{м}$. Для расчетов используются уравнение (31.4) с индексом политропы $n=1.38$ и сплайновая интерполяция данных на рис. 31.11, преобразованных в СИ (рис. 31.21), для уравнений (31.7).

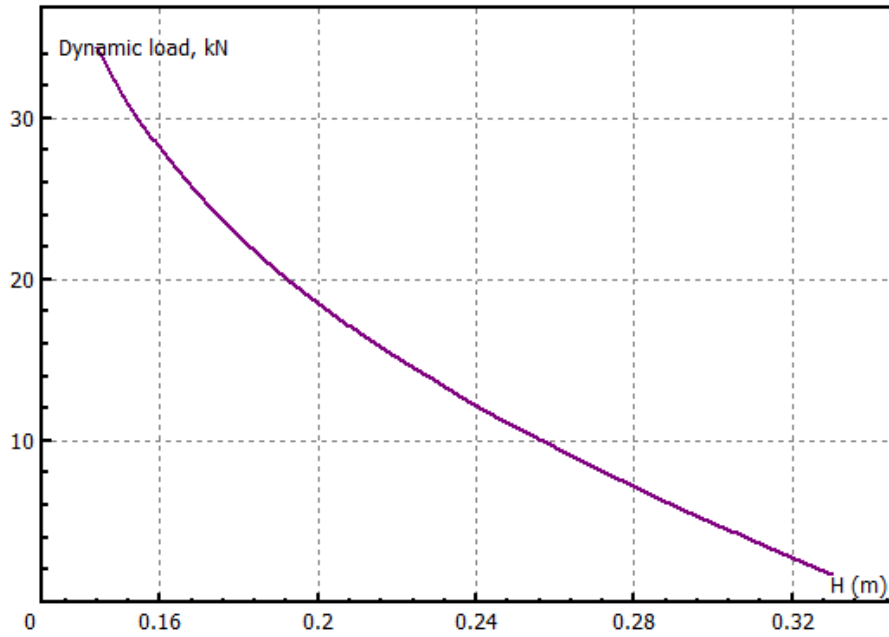


Рис. 31.20. Сила в зависимости от высоты при динамическом нагружении для ПР 1Т15-М0

H \ P	1.3794E5	2.7589E5	4.1383E5	5.5178E5	6.8972E5	H \ P	6.8972E5
0.10922	6727.5	13389	20478	27604	34929	0.10922	0.0042417
0.127	6383.6	12707	19211	26053	32859	0.127	0.0051394
0.1524	6081.9	12212	18650	24997	31508	0.1524	0.0063704
0.1778	5973.3	12031	18499	24871	31297	0.1778	0.0075925
0.2032	5858.7	11790	18210	24515	30941	0.2032	0.0087901
0.2286	5695.8	11331	17473	23598	29782	0.2286	0.0099478
0.254	5339.8	10360	15862	21462	27218	0.254	0.011083
0.2794	4368.4	8459.2	13250	18167	23573	0.2794	0.012143
0.3048	2829.8	5937.1	9859	14010	18843	0.3048	0.012994
0.3302	959.35	3047	5744	9153	12948	0.3302	0.013745

Force (N)

Volume (m³)

Рис. 31.21. Данные для ПР 1Т15-М0 в СИ

Рассчитаем динамическую силу для двух значений высоты ПР $h_1 = 0.1524\text{м}$ и $h_2 = 0.254\text{м}$, следуя инструкциям в руководстве [5].

- Объем в статическом положении из рис. 31.21: $V_0 = 0.0087901\text{м}^3$;
- Сила для $h_0 = 0.2032\text{м}$ из третьего столбца на рис. 31.21: $F_{r0} = 18210\text{Н}$;
- Давление для $h_0 = 0.2032\text{м}$ из третьего столбца на рис. 31.21: $p_r = 413830\text{Па}$;
- Эффективная площадь в статическом положении $A_0 = F_{r0}/p_r = 0.0440036\text{м}^2$;
- Манометрическое давление в статическом положении $p_{0g} = F_0/A_0 = 409058\text{Па}$;
- Абсолютное давление в статическом положении $p_{0a} = p_{0g} + 101325 = 510383\text{Па}$;
- Объем в положении 1 из рис. 31.21: $V_1 = 0.0063704\text{м}^3$;
- Сила в положении 1 из третьего столбца на рис. 31.21: $F_{r1} = 18650\text{Н}$;
- Эффективная площадь в положении 1: $A_1 = F_{r1}/p_r = 0.0450668\text{м}^2$;
- Абсолютное давление в положении 1 из (31.4): $p_{1a} = p_{0a}(V_0/V_1)^{1.38} = 795898\text{Па}$;
- Манометрическое давление в положении 1: $p_{1g} = p_{1a} - 101325 = 694573\text{Па}$;

- Динамическая нагрузка в положении 1: $F_1 = p_{1g}A_1 = 31302\text{Н}$;
- Объем в положении 2 from рис. 31.21: $V_1 = 0.011083\text{м}^3$;
- Сила в положении 2 из третьего столбца на рис. 31.21: $F_{r2} = 15862\text{Н}$;
- Эффективная площадь в положении 2: $A_2 = F_{r2}/p_r = 0.0383297\text{м}^2$;
- Абсолютное давление в положении 2 из (31.4): $p_{1a} = p_{0a}(V_0/V_2)^{1.38} = 370664\text{Па}$;
- Манометрическое давление в положении 2: $p_{2g} = p_{2a} - 101325 = 269339\text{Па}$;
- Динамическая нагрузка в положении 2: $F_2 = p_{2g}A_2 = 10324\text{Н}$;

Теперь сколем мышкой в графическом окне UM значения силы:

$$F_{1UM} = 31756\text{Н}, F_{2UM} = 10125\text{Н},$$

которые имеют отклонения 1.4% и 1.9% от рассчитанных выше значений F_1, F_2 .

31.2.4. Соединения (простые узлы)

Простой узел - это соединение любого числа пневматических трубок. Давление и температура являются переменными состояния простого узла. Пусть i - номер простого узла, а \dot{m}_{il} - массовый расход трубки l , соединенной с узлом. Массовый расход положительный $\dot{m}_{il} > 0$, если поток входит в узел. Математическая модель узла соответствует закону Кирхгофа

$$\sum_l \dot{m}_{il} = 0. \quad (31.8)$$

31.2.5. Пневматические каналы и трубки

Канал или пневмотрубка соединяет два узла i, j , каждый из которых является камерой, пневморессорой либо простым узлом. Длина трубки L , диаметр d или D .

Стационарная модель пневмотрубки включает зависимость массового расхода воздуха от падения давления

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (31.9)$$

где $p_1 = \max(p_1, p_2)$, $p_2 = \min(p_1, p_2)$.

Динамическая модель пневмотрубки описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных относительно давления и массового расхода

$$p = p(x, t), \dot{m} = \dot{m}(x, t),$$

где x - продольная координата вдоль трубки.

Ниже мы рассмотрим как стационарные, так и динамическую модели трубок, которые реализованы в UM.

31.2.5.1. Стационарные модели пневмотрубок

31.2.5.1.1. Модель массового расхода "Atlas"

Данная модель использует формулу ISO 6358 для массового расхода сопла [8]

$$\dot{m} = \begin{cases} p_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_2 - b}{p_1(1-b)}\right)^2}, & \frac{p_2}{p_1} > b \\ p_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}, & \frac{p_2}{p_1} \leq b \end{cases} \quad (31.10)$$

где C - проводимость, b - критическое отношение давлений, T_1 - температура в узле 1 (К), ρ_0, T_0 - стандартные значения плотности (кг/м^3) и температуры (К) (31.1), для которых определялись параметры C и b .

Модель "Atlas" [9] включает эмпирические зависимости для параметров C, b

$$C = \frac{0.029D^2}{\sqrt{\frac{L}{D^{1.25}} + 510}}, b = \frac{474C}{D^2}. \quad (31.11)$$

С вычислительной точки зрения, формула ISO 6358 (31.10) имеет существенный недостаток: производная массового расхода стремится к бесконечности, когда разность давлений стремится к нулю,

$$\frac{d\dot{m}}{d\Delta p} \xrightarrow{\Delta p \rightarrow 0} \infty. \quad (31.12)$$

Это свойство вызывает определенные проблемы для численных методов. Следуя предложению в работе [8], мы заменяем модель (31.10) линейной моделью в области ламинарного потока. Определим критическое значение отношения $r_b = p_2/p_1$, соответствующего граничному числу Рейнольдса для ламинарного потока $\text{Re}^* = 2000$.

$$\dot{m}^* = A \rho_1 w^* = \frac{A \mu \text{Re}^*}{D} = p_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} \sqrt{1 - \left(\frac{r_b^* - b}{1-b}\right)^2} \approx p_1 C \rho_0 \sqrt{1 - \left(\frac{r_b^* - b}{1-b}\right)^2},$$

$$r_b^* = b + (1-b) \sqrt{1 - \left(\frac{A \mu \text{Re}^*}{D C \rho_1}\right)^2} \approx 1 - 0.5(1-b) \left(\frac{A \mu \text{Re}^*}{D p_1 C \rho_0}\right)^2.$$

Здесь A - площадь сечения трубки. Рассмотрим пример: для трубки $L=10\text{м}$, $D=5\text{мм}$, $p_1 = p_0$ мы получаем $r_b^* \approx 0.991$. Используется следующая модель массового расхода ламинарного потока:

$$\dot{m} = \dot{m}^* \frac{1 - r_b}{1 - r_b^*}, \quad r_b = \frac{p_2}{p_1} > r_b^*. \quad (31.13)$$

31.2.5.1.2. Модель массового расхода "Механика жидкости"

Эта модель основана на уравнении баланса энергии потока, [10]

$$\ln \frac{w_1}{w_2} + \frac{p_2^2 - p_1^2}{2p_1 \rho_1 w_1^2} + \frac{\lambda(w_1)L}{2D} = 0 \quad (31.14)$$

где w - скорость потока, $\lambda(w_1)$ - коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\rho_1 D w_1}{\mu}.$$

Для ламинарного потока [8]

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}, \text{Re} < 2000. \quad (31.15)$$

В случае турбулентного потока используется уравнение Блазиуса

$$\lambda = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}, \text{Re} > 4000 \quad (31.16)$$

или неявное уравнение Никурадзе-Прандтла-Кармана (Nikuradse-Prandtl-Karman, NPK)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(\text{Re}\sqrt{\lambda}) - 0.8. \quad (31.17)$$

Для $\text{Re} \in [2000, 4000]$ мы используем линейную интерполяцию коэффициента сопротивления между граничными значениями, посчитанными по формулам (31.15) и (31.16) или (31.17).

Кроме того, предполагаем, что

$$\frac{w_1}{w_2} \approx \frac{p_1}{p_2}$$

и соотношение (31.14) может быть переписано в виде

$$w_1 = \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1\rho_1 \left(\frac{f(w_1)L}{2D} + \ln \frac{p_1}{p_2} \right)}} \quad (31.18)$$

Соотношение (31.18) является нелинейным и неявным уравнением относительно w_1 . Оно может быть решено методом прямых итераций.

Затем массовый расход рассчитывается из соотношения

$$\dot{m} = A\rho_1 w_1 = \frac{\pi D^2}{4} \rho_1 w_1 \quad (31.19)$$

31.2.5.1.3. Уравнение Дарси-Вайсбаха

Уравнение Дарси-Вайсбаха [11] - это соотношение между потерей гидравлического напора h в трубке и средней скоростью потока w

$$h = \frac{(p_1 - p_2)}{\rho_1 g} = \frac{fL w_1^2}{D 2g}$$

или

$$w_1 = \sqrt{\frac{2D(p_1 - p_2)}{f(w_1)\rho_1 L}}. \quad (31.20)$$

Коэффициент Дарси гидравлического сопротивления f определяется в зависимости от числа Рейнольдса по диаграммам Розе или Муди (Rose, Moody) [11], [12], рис. 31.22. Для определения коэффициента требуется также задать дополнительный параметр: относительную шероховатость трубки

$$\frac{\varepsilon}{D}. \quad (31.21)$$

Нелинейное уравнение (31.20) решается методом прямых итераций для получения значения скорости потока w_1 . Наконец, уравнение (31.19) дает массовый расход потока.

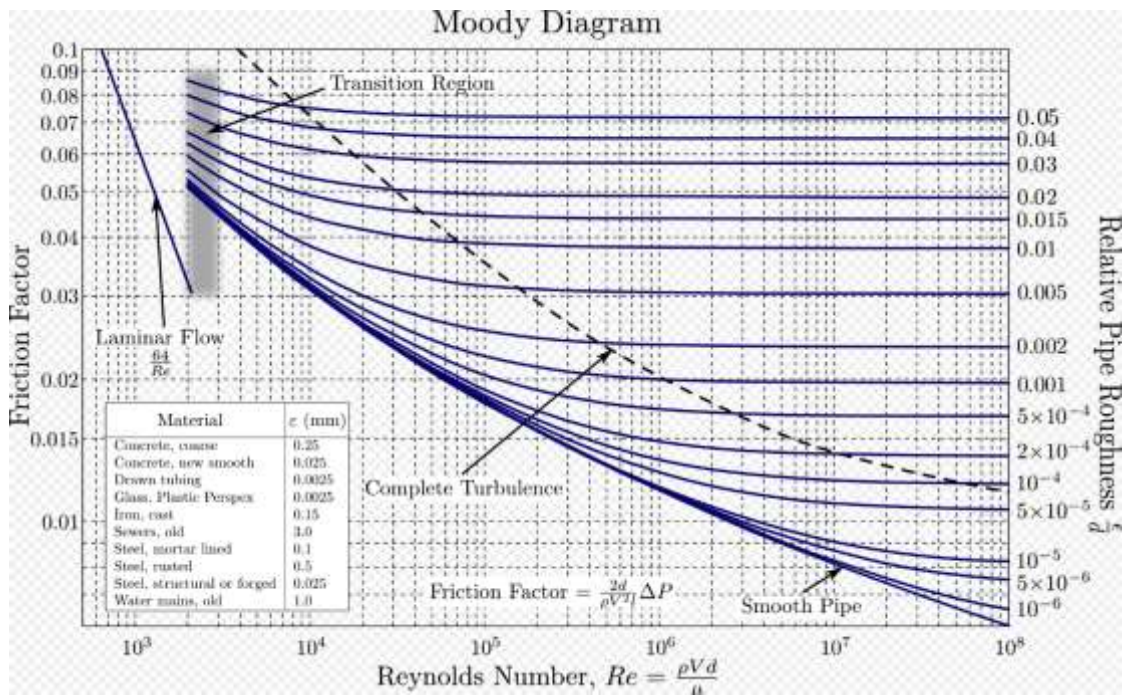
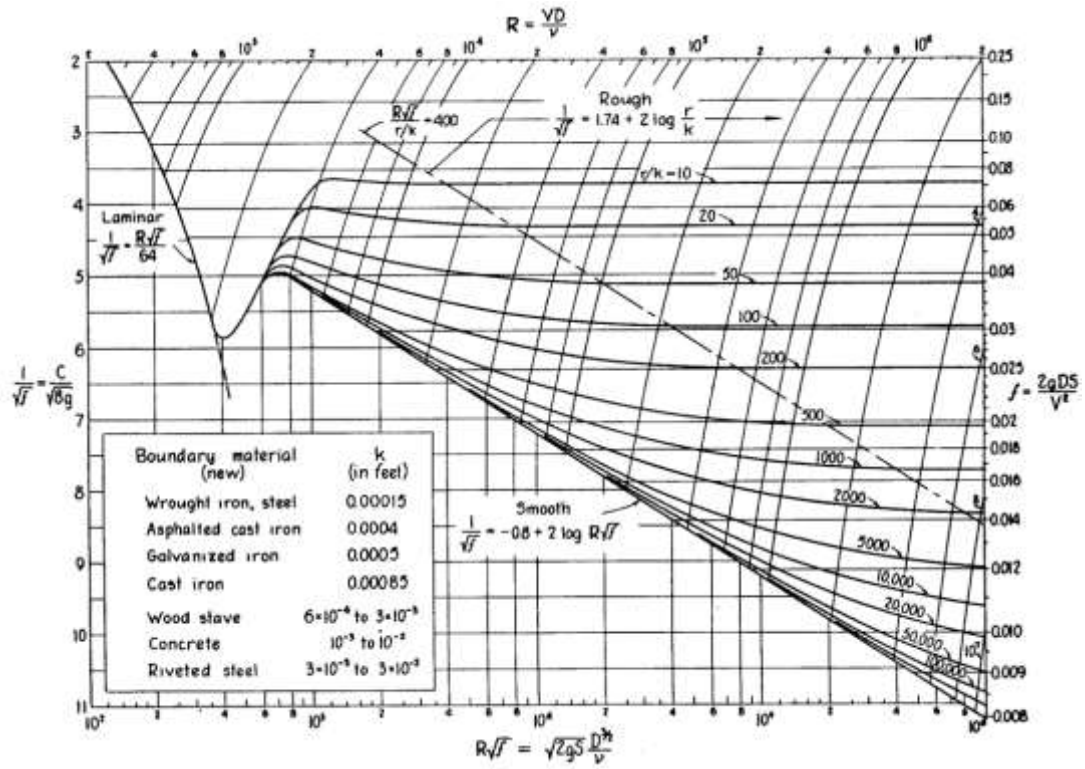


Рис. 31.22. Диаграммы Роузе и Мууди для гидравлического сопротивления

31.2.5.1.4. Сравнение моделей

Модели "Atlas" и "Механика жидкости" для массового расхода дают близкие результаты для различных значений длины трубки, рис. 31.23. Уравнение Дарси-Вайсбаха может быть также использовано для длинных трубок при относительной шероховатости $\epsilon/D \sim 0.01$ для $p_2 \sim 0$ и $\epsilon/D \sim 0$ для $p_2 \sim 5$ бар. Область ламинарного течения с линейным ростом массового расхода показана на рис. 31.24 при малых перепадах давления.

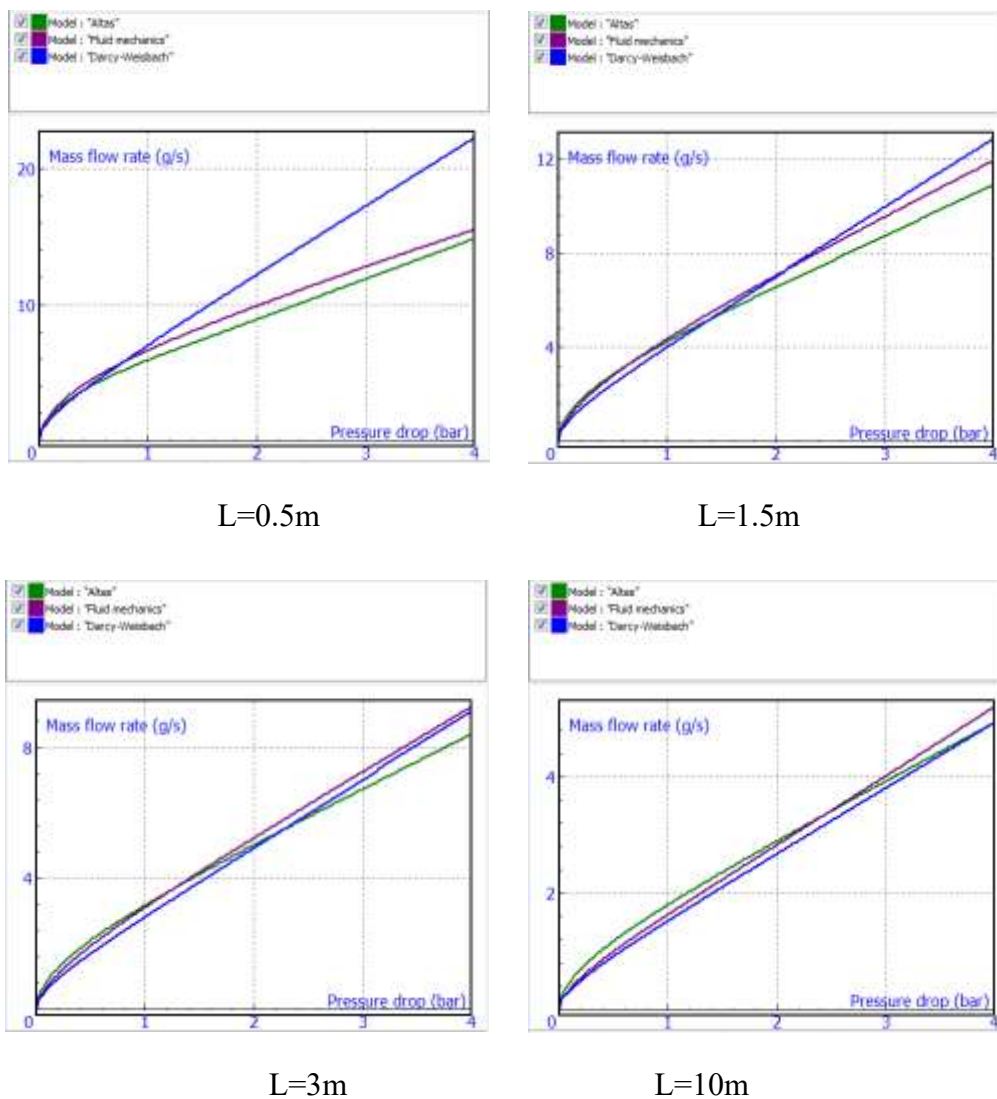


Рис. 31.23. Сравнение моделей массового расхода потока для трубок различной длины, D=5мм.

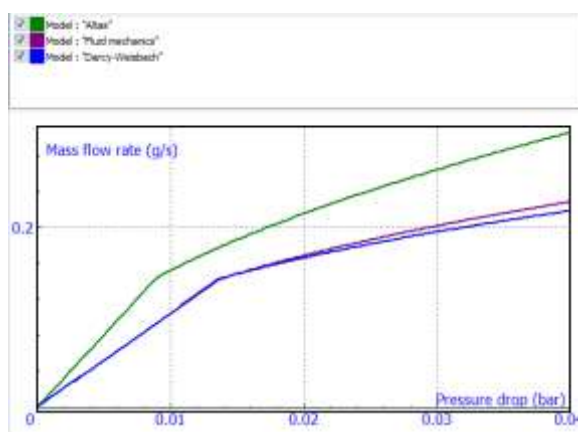


Рис. 31.24. Сравнение моделей массового расхода потока для малого перепада давления, L=10м, D=5мм.

31.2.5.2. Динамическая модель пневмотрубки

Известно, что стационарная модель пневматических трубок и каналов может быть успешно использована только для низкочастотных процессов [8]. Напротив, динамическая

модель, которая рассмотрена здесь, может быть использована как в области низких, так и высоких частот. Модель не может использоваться для моделирования сверхзвуковых потоков и ударных волн.

31.2.5.2.1. Математическая модель

Одномерная динамическая модель потока жидкости в трубке, реализованная в UM, является несколько обобщенной версией модели, описанной в работе [8].

Во-первых, модель включает уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho w}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + w \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad (31.22)$$

где w - скорость потока, ρ - плотность.

Предполагается, что для воздуха в трубке выполняется политропный процесс,

$$p\rho^{-n} = c = \text{const}. \quad (31.23)$$

Производная от уравнения (31.23) по времени t дает

$$\rho^{-n} \frac{dp}{dt} - n p \rho^{-n-1} \frac{d\rho}{dt} = 0$$

или

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho}{np} \frac{dp}{dt} \quad (31.24)$$

Подставляя соотношение (31.24) в уравнение (31.22) и полагая

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = \frac{\partial A \rho w}{\partial x} \approx A \rho \frac{\partial w}{\partial x}$$

мы получим первое уравнение

$$\frac{dp}{dt} + \frac{np}{A\rho} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = 0. \quad (31.25)$$

В работе [8] предполагается изотермический процесс для длинных трубок. Этот вариант мы получим, подставляя значение $n=1$ в уравнение (31.25) и учитывая закон идеального газа $p = \rho RT$.

Второе уравнение, полученное в [8], соответствует уравнению движения малой секции потока

$$\frac{d\dot{m}}{dt} + A \frac{\partial p}{\partial x} = -A \frac{\lambda \rho}{2D} w^2. \quad (31.26)$$

Здесь λ - коэффициент сопротивления, см. п. 31.2.5.1.2 *Модель массового расхода "Механика жидкости"*, D, A - диаметр и площадь сечения трубки.

Следуя [8], рассмотрим алгоритм численного решения уравнений (31.25), (31.26). Трубка разделяется на N сегментов одинаковой длины $\Delta L = L/N$. Непрерывные переменные $p = p(x, t), \dot{m} = \dot{m}(x, t)$ заменяются дискретными переменными на концах сегментов

$$p_i = p(x_i, t), \quad \dot{m}_i = \dot{m}(x_i, t), \\ x_i = \Delta L i, \quad i = 0, \dots, N.$$

Частные производные по координате заменяются левыми или правыми конечными разностями (ниже записаны правые конечные разности)

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=x_i} = \frac{p_{i+1} - p_i}{\Delta L}, \quad \left. \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} \right|_{x=x_i} = \frac{\dot{m}_{i+1} - \dot{m}_i}{\Delta L}$$

В результате получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, которая решается в УМ

$$\begin{aligned} \frac{dp_i}{dt} &= -w_i \frac{p_{i+1} - p_i}{\Delta L} - \frac{np_i}{A\rho_i\Delta L} (\dot{m}_{i+1} - \dot{m}_i) \\ \frac{d\dot{m}_i}{dt} &= -w_i \frac{\dot{m}_{i+1} - \dot{m}_i}{\Delta L} - A \frac{p_{i+1} - p_i}{\Delta L} - A \frac{\lambda_i\rho_i}{2D} w_i^2 \end{aligned} \quad (31.27)$$

Уравнения (31.27) записаны для правых конечных разностей. При необходимости для некоторых узлов они заменяются левыми, например при $i = N$. Число уравнений зависит от граничных условий. Например, если трубка соединяет две камеры, давления в начале и конце трубки равны давлениям в камерах, и уравнения для давления при $i = 0$ и $i = N$ опускаются. В этом случае полное число уравнений равно $2N$.

31.2.5.2.2. Верификация динамической модели

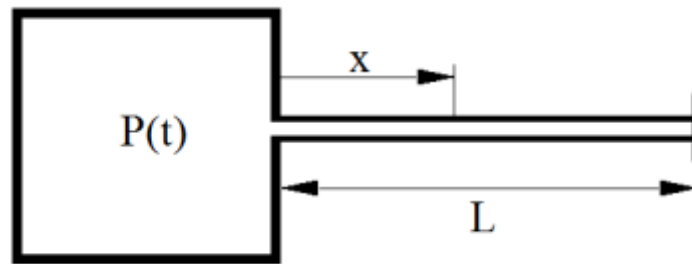


Рис. 31.25. Схема экспериментальной установки для верификации динамической модели пневмотрубки

Следуя книге [8], рассмотрим моделирование динамики потока в длинной трубке в соответствии с экспериментальной установкой, изображенной на рис. 31.25. Давление в камере, соединенной с левым концом трубки, является заданной функцией времени $p(0) = P(t)$, правый конец трубки закрыт. Рассмотрим сравнение моделирования и результатов экспериментов для давления в правом конце трубки $p(L)$, когда в качестве $P(t)$ задается либо ступенчатая функция, либо гармоническое возмущение. Для этого теста мы используем инструмент УМ, описанный в п. 31.3.2.3.3 *Инструмент для тестирования динамической модели трубки.*

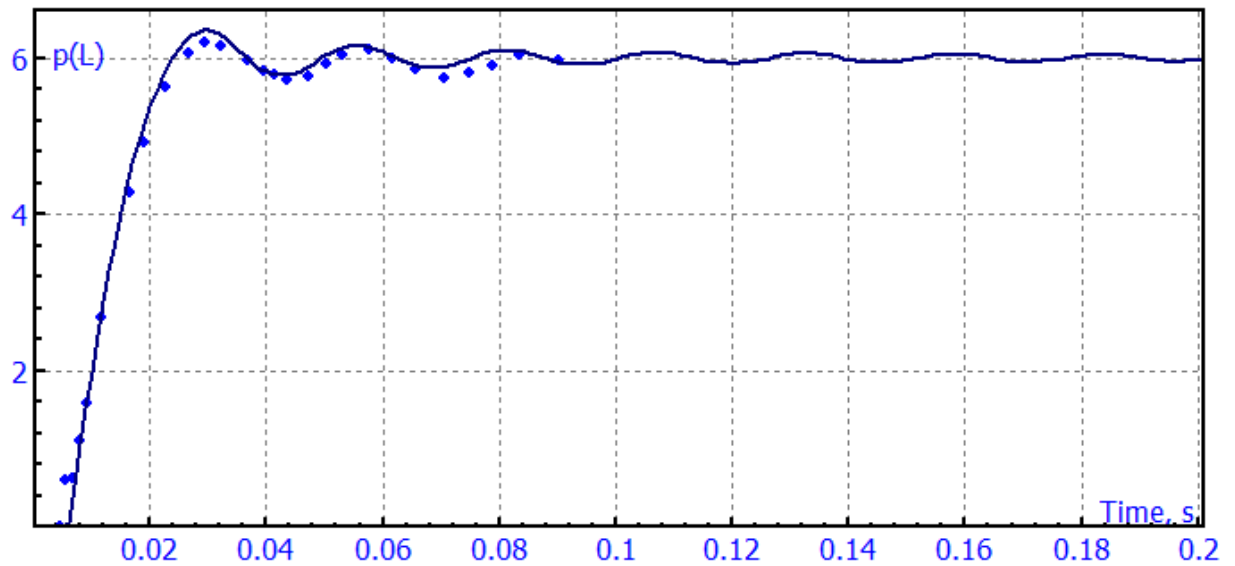


Рис. 31.26. Отклик на ступенчатое возмущение. Сравнение с экспериментом

Во-первых, рассмотрим отклик на ступенчатое возмущение, причем ступенчатая функция аппроксимируется следующим выражением:

$$P(t) = P_0(1 - e^{-t/T_s})$$

где $P_0 = 6$ бар, $T_s = 0.005$ с. Сравнение численного моделирования с экспериментальными результатами из [8] приведено на рис. 31.26. Значение индекса политропы в расчете принималось $n = 1.08$.

Следующие два теста относятся к гармоническим возмущениям. В численном моделировании мы используем метод скользящей частоты возмущения

$$P(t) = P_0 + \Delta P \sin(2\pi(f_0 + \epsilon t/2)t).$$

В частности, эти тесты позволяют нам сравнить собственные частоты колебаний воздуха в трубке с экспериментальными и теоретическими значениями. Теоретические собственные частоты колебаний столба воздуха в трубке на рис. 31.25 равны

$$f_i = \frac{ic}{4L}, i = 1,3,5 \dots$$

Здесь c - скорость звука

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}$$

где $\gamma=1.4$.

Следуя книге [8], мы выполним два теста:

1. $L = 1$ м, $D = 2.5$ мм, $P_0 = 7$ бар, $\Delta P = 0.1$ бар, $N = 15$
2. $L = 25$ м, $D = 5.5$ мм, $P_0 = 7$ бар, $\Delta P = 0.1$ бар, $N = 35$

Первая теоретическая собственная частота f_1 равна 85.8Гц для теста 1 и 3.43Гц для теста 2.

Сравнение результатов моделирования и эксперимента для величины $(P(L) - P_0)/\Delta P$ представлено на рисунках внизу. Экспериментальные данные из [8] отмечены маркером.

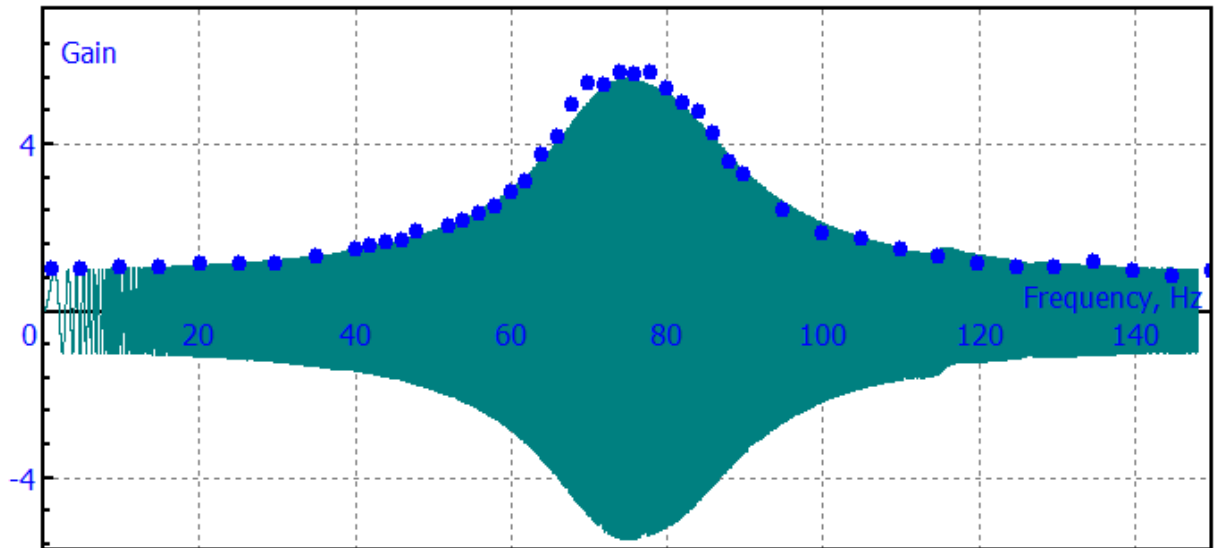


Рис. 31.27. Частотный отклик для теста 1, значение индекса политропы $n = 1.2$

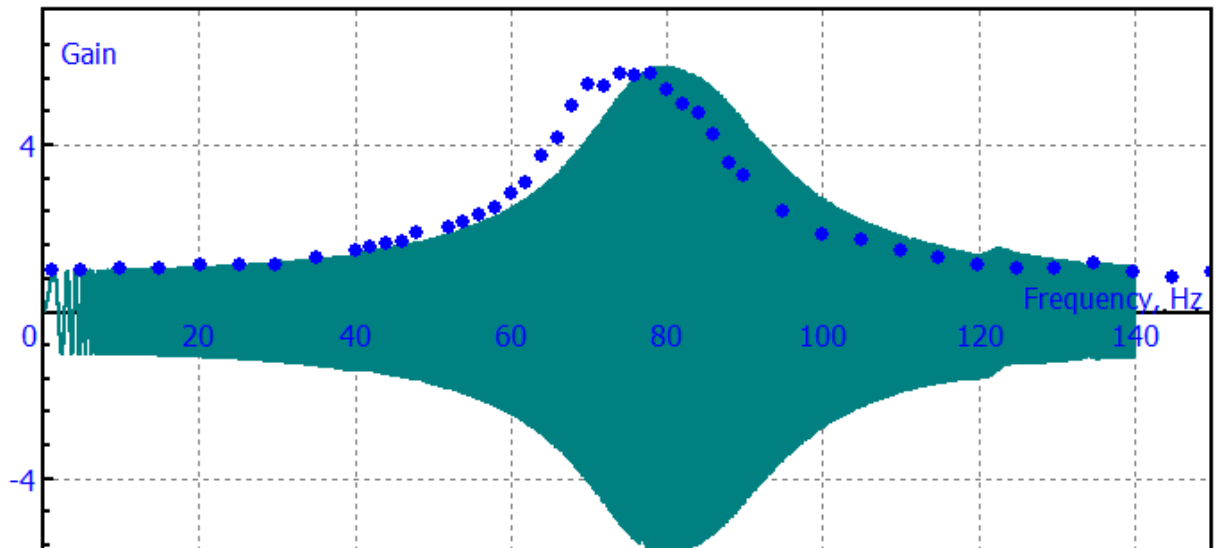


Рис. 31.28. Частотный отклик для теста 1, значение индекса политропы $n = 1.4$

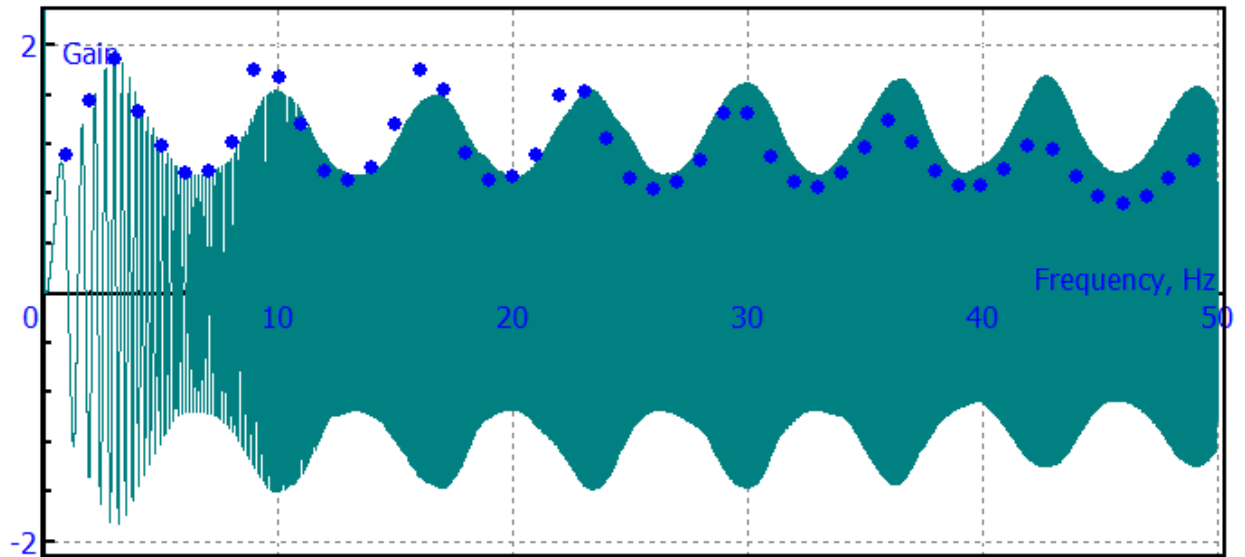


Рис. 31.29. Частотный отклик для теста 2, значение индекса политропы $n = 1.4$

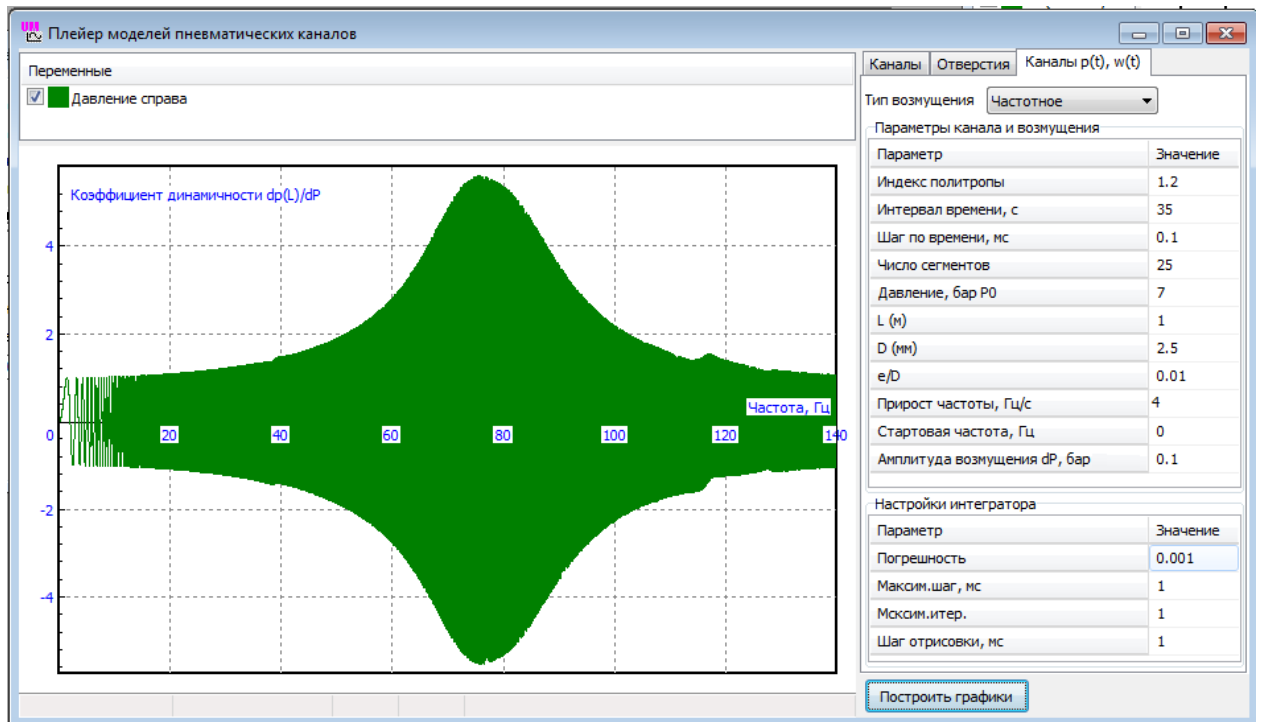


Рис. 31.30. Настойка параметров для теста 1

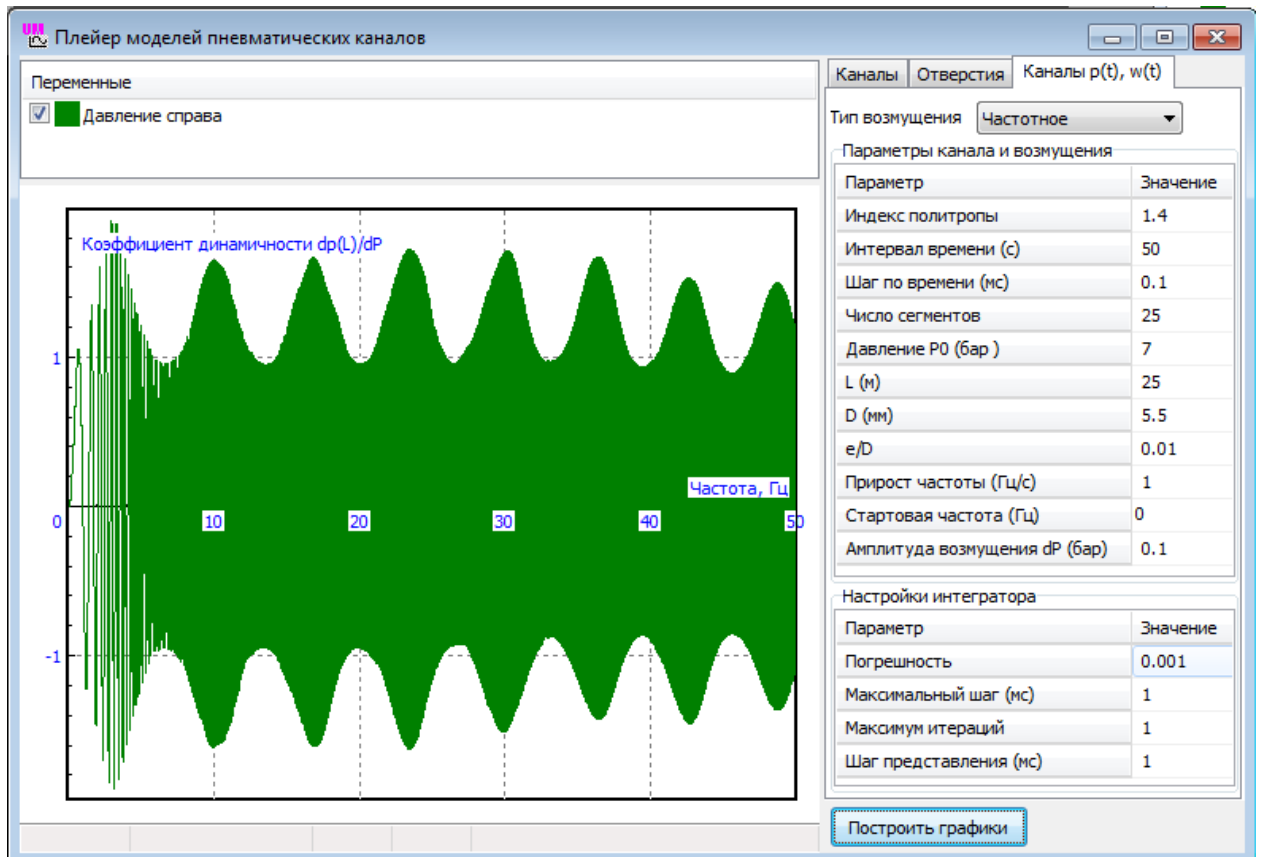


Рис. 31.31. Настойка параметров для теста 2

31.2.6. Отверстия

Подобно пневмотрубке, отверстие (сопло, ограничение) является связью между двумя узлами пневматической систем. Математическая модель отверстия включает зависимость массового расхода потока от падения давления.

31.2.6.1. Сопло

Пусть $p_1 > p_2$ - давления в соединяемых узлах. Массовый расход потока для сопла рассчитывается по формуле [8]

$$\dot{m} = AC_d p_1 \sqrt{\frac{2}{RT_1}} \psi(r_p), \quad (31.28)$$

$$\psi(r_p) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1} (r_p^{2/\gamma} - r_p^{(\gamma+1)/\gamma})}, & r_p > b \\ \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma+1}} = 0.484, & r_p \leq b \end{cases}$$

$$b = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 0.528,$$

$$r_p = \frac{p_2}{p_1}.$$

Здесь A - площадь сопла, C_d - коэффициент истечения. Параметры заданы в системе СИ (Па, м², м³).

Коэффициент истечения $C_d \leq 1$ зависит от геометрии сопла. В частности, для закругленного сопла $C_d = 1$. Значения этого параметра для различных сопел с острыми краями можно найти в [8].

Ламинарный поток.

Подобно модели ISO 6358, производная от массового расхода стремится к бесконечности при стремлении к нулю разности давлений (31.12). Рассмотрим уравнение (31.28) для малого падения давления

$$r_p = 1 - \epsilon, \epsilon \ll 1$$

и выведем отношение давлений, соответствующее граничному для ламинарного потока значению числа Рейнольдса $Re^* = 2000$.

$$\psi(r_p) = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1} ((1-\epsilon)^{2/\gamma} - (1-\epsilon)^{(\gamma+1)/\gamma})} \approx \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1} (-\epsilon 2/\gamma + \epsilon (\gamma+1)/\gamma)} = \sqrt{\epsilon},$$

$$Re^* = \frac{\dot{m}^* D}{A \mu} = \frac{AC_d p_1 D}{A \mu} \sqrt{\frac{2}{RT_1}} \sqrt{\epsilon^*},$$

$$r_p^* = 1 - \epsilon^* = 1 - \frac{RT_1}{2} \left(\frac{A \mu Re^*}{AC_d p_1 D}\right)^2.$$

Приведем окончательные выражения для области ламинарного потока

$$\dot{m} = \dot{m}^* \frac{1 - r_b}{1 - r_b^*}, \quad r_b = \frac{p_2}{p_1} > r_b^*, \quad (31.29)$$

$$\dot{m}^* = AC_d p_1 \sqrt{\frac{2\epsilon^*}{RT_1}}.$$

Пример для круглого отверстия $D = 5\text{мм}$: $\epsilon^* \approx 0.00022$, $r_b^* \approx 0.99978$.

31.2.6.2. ISO 6358

Модель ISO 6358 для массового расхода потока [8] уже использовалась выше в п. 31.2.5.1.1 *Модель массового расхода "Atlas"*, уравнение (31.10). Здесь мы укажем, что для элемента "Отверстие" мы используем эту модель в двух формах:

- **Стандартная реализация.** Пользователь задает значение проводимости C и критического отношения давлений b .
- Модель C/d^2 для ограничителей, предложенная в [13], [14]:

$$\frac{C}{d^2} = 8 \text{ дм}^3/(\text{мин} \cdot \text{бар} \cdot \text{мм}^2) = 1.33 \times 10^{-9} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{Па} \cdot \text{мм}^2)$$

31.2.6.3. Сравнение моделей отверстия

Модель сопла для определенного значения коэффициента истечения C_d и отношения давлений b дает очень близкие результаты моделями из п. 31.2.6.2 ISO 6358. Для того чтобы получить связь между параметрами C_d и C , рассмотрим условие равного критического потока при $p_2/p_1 = b$ для уравнений (31.10) и (31.28)

$$p_1 C \rho_0 \sqrt{\frac{T_0}{T_1}} = AC_d p_1 \sqrt{\frac{2}{RT_1}} \psi(b) = \frac{1}{4} \pi d^2 10^{-6} C_d p_1 \sqrt{\frac{2}{RT_1}} 4.84,$$

$$\frac{C}{d^2} = 0.121 \cdot 10^{-6} \frac{\pi}{\rho_0} \sqrt{\frac{2}{RT_0}} = 1.539 \cdot 10^{-9} C_d$$

Диаметр отверстия в этой формуле измеряется в миллиметрах.

Таким образом, модель сопла дает близкие результаты с моделью C/d^2 ISO 6358 из предыдущего раздела для следующего значения коэффициента истечения, рис. 31.32:

$$C_d = 0.866.$$

Сравнение моделей при малом падении давления рис. 31.33 иллюстрирует область ламинарного потока.

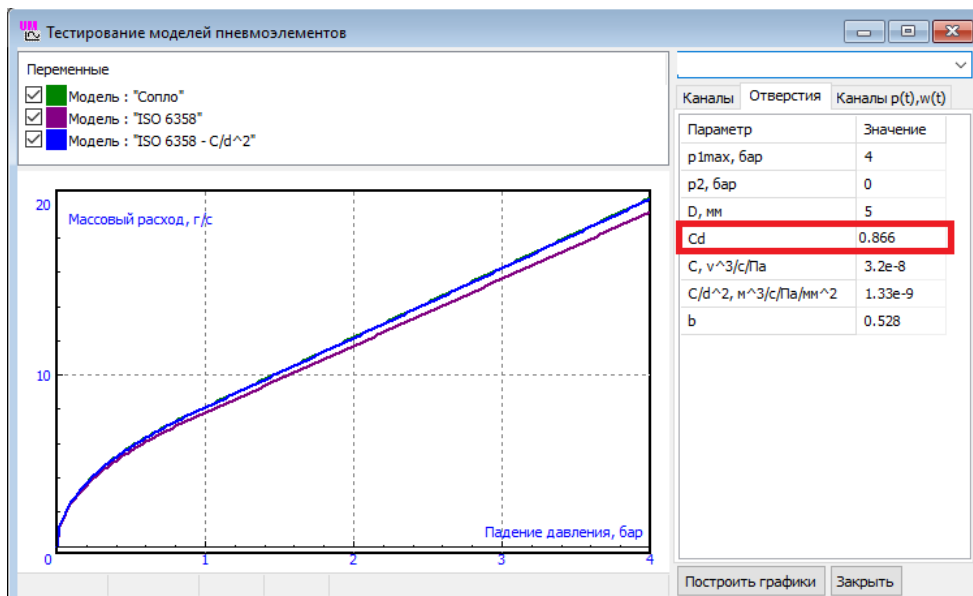
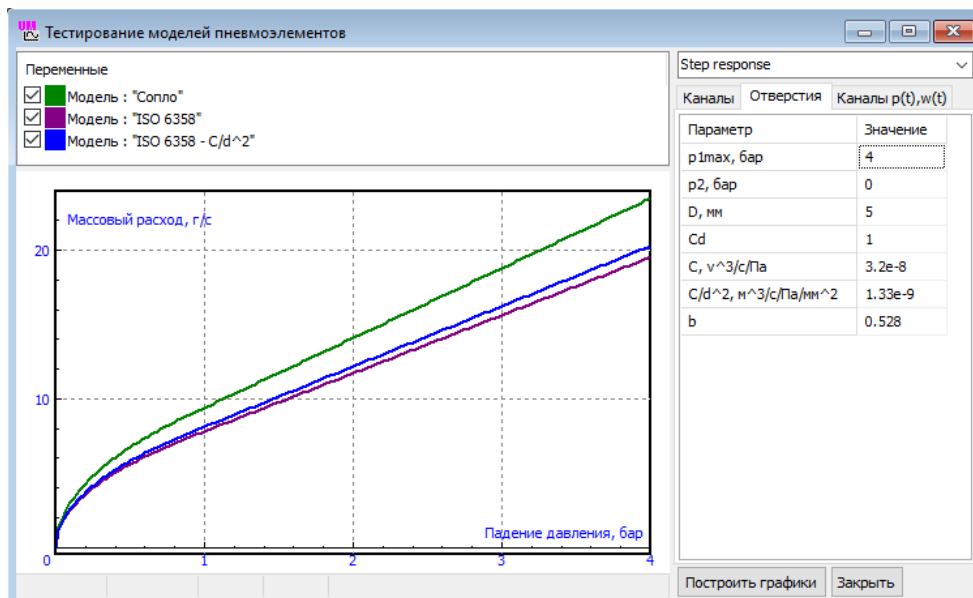


Рис. 31.32. Сравнение массового расхода отверстия для различных моделей

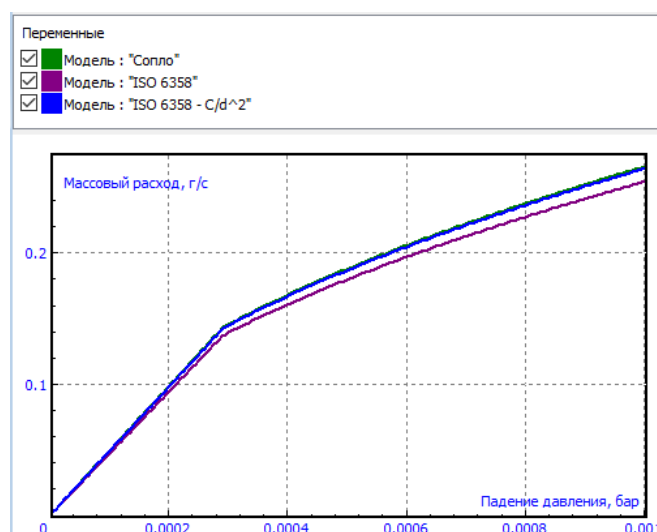


Рис. 31.33. Сравнение моделей отверстия для малого падения давления

31.2.7. Пневмораспределители (клапаны)

31.2.7.1. Клапан контроля высоты (HCV, LV)

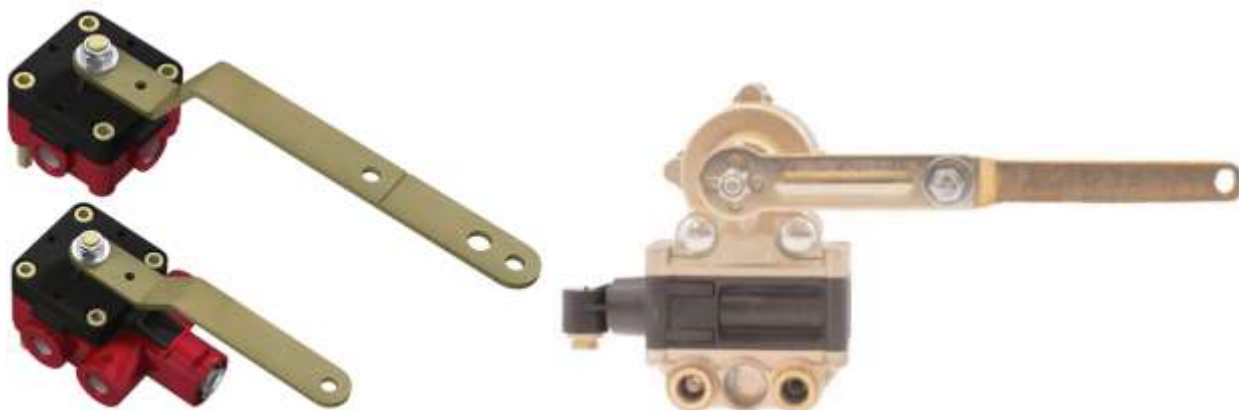


Рис. 31.34. Примеры клапанов

Клапан контроля высоты (HCV- height control valve или LV – leveling valve) используется в автомобильной и железнодорожной отрасли для поддержания желаемого значения высоты подвески при различной нагруженности кузова грузового автомобиля или пассажирского вагона.

Пневмораспределитель данного типа имеет схему 3/3, то есть имеет три порта и три состояния (трехлинейный трехпозиционный распределитель). Порты:

- 1 – соединение с резервуаром высокого давления (впуск);
- 2 – соединение с пневмосистемой (выпуск);
- 3 – соединение с атмосферой (выхлоп).

Состояния:

- 1 – все линии закрыты;
- 2 – соединение линий 1-2, то есть увеличение давления в системе
- 3 – соединение линий 2-3, то есть снижение давления в системе.

В состояниях 2 и 3 поток через клапан плавно изменяется при повороте рычага управления, рис. 31.34. В нейтральном положении рычага порты 1 и 3 закрыты. При повороте в одну сторону плавно открывается порт впуска, в другую – порт выпуска.

Корпус НСV монтируется на раме кузова вагона или автомобиля связывающим элементом с шарнирами по концам, рис. 31.35. Длина связующего элементы подбирается так, чтобы нейтральное положение рычага управления соответствовало требуемой высоте подвески, а при пониженной высоте подвески рычаг поворачивался в сторону, соответствующую впуску (повышению давления в системе).

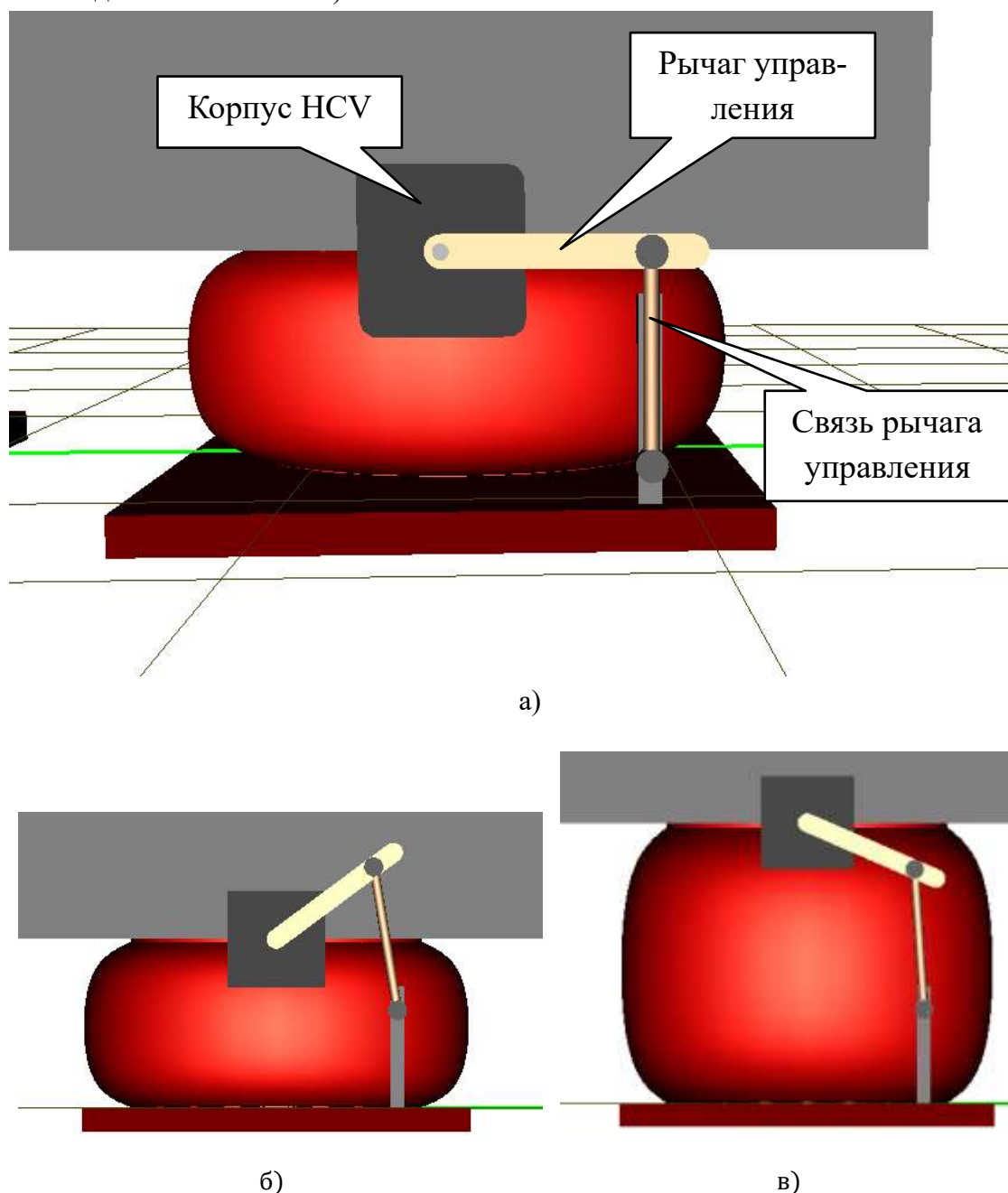


Рис. 31.35. Пример модели UM с клапаном НСV в нейтральной позиции а), в положении для впуска б) и выхлопа в)

31.2.7.1.1. Характеристика клапана HCV

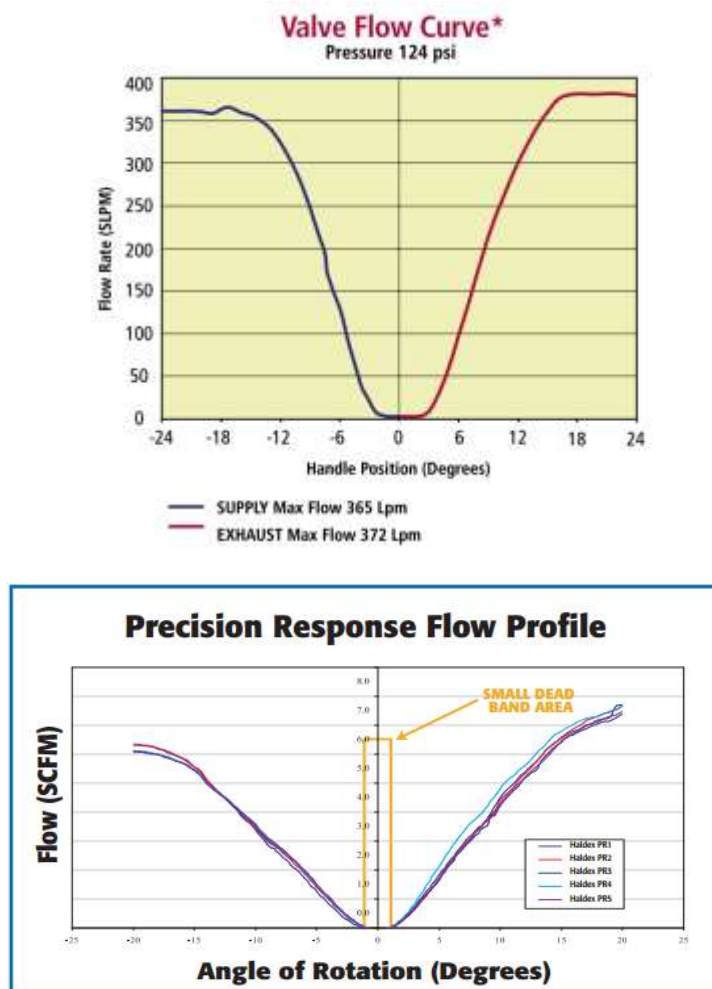


Рис. 31.36. Примеры характеристики клапанов

Характеристикой HCV является зависимость объемного потока через клапан от угла поворота рычага управления δ при заданной значении давления в камере p^* , к которой присоединен клапан. На рис. 31.36 представлены примеры такой зависимости для клапанов, производимых компаниями Hendrickson и Haldex. Файлы с техническими данными этих клапанов доступны по ссылкам

<https://www.hendrickson-intl.com/getattachment/2c9528e0-ca6d-47ec-aad6-94343380cca0/L1024.pdf>.

<http://www.heightcontrolvalve.com/docs/Haldex/Precision-Response-HCV-Product-Information.pdf>

В нейтральном положении рычага порты клапана перекрыты. При повороте в одну сторону (отрицательное значение угла на рис. 31.36) открывается канал, связывающий пневмосистему с резервуаром со сжатым воздухом, для повышения давления в пневмосистеме и увеличения высоты подвески. При повороте в другую сторону (положительное значение угла на рис. 31.36) открывается канал связи пневмосистемы с атмосферой для снижения давления и уменьшения высоты подвески.

31.2.7.1.2. Математическая модель HCV

Математическая модель HCV основана на формуле для массового расхода (31.28)

$$\dot{m} = C(\delta)p_1 \sqrt{\frac{2}{RT_1}} \psi(r_p),$$

Коэффициент истечения $C(\delta)$ выражается через зависимость массового расхода от угла поворота $\dot{m}(\delta)$, заданную характеристикой клапана, аналогичной рис. 31.34,

$$C(\delta) = \frac{\dot{m}(\delta)}{p^* \psi^*} \sqrt{\frac{RT^*}{2}},$$

$$\psi^* = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma + 1}} = 0.484.$$

Здесь p^*, T^* - абсолютное давление и температура (К), для которых получена характеристика HCV.

31.2.7.1.3. Создание файла UM *.hcv с моделью клапана HCV

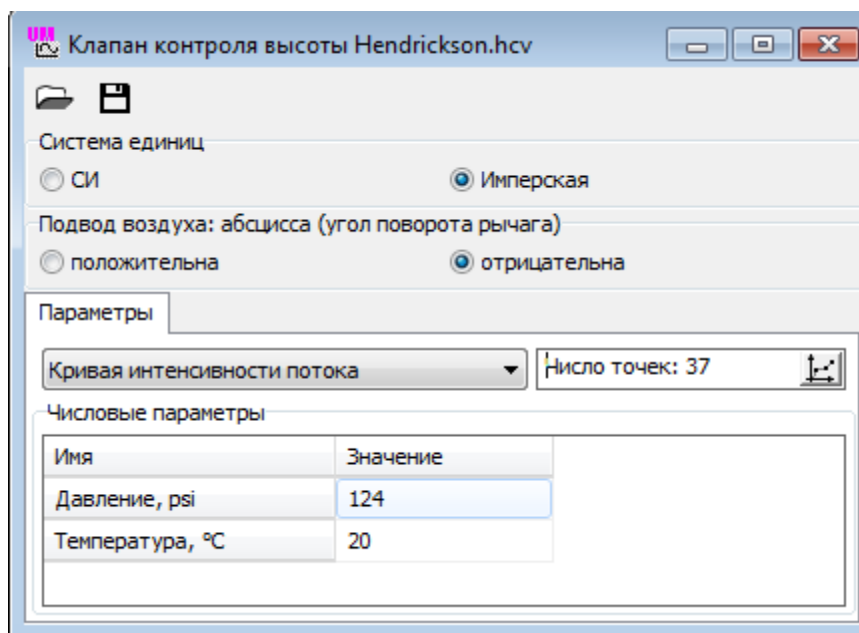


Рис. 31.37. Окно для создания модели клапана контроля высоты


Модель клапана HCV должна быть сохранена в виде файла *.hcv. Эти файлы размещаются в каталоге {Данные УМ } \AirSpring, пример:


c:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\2023\AirSpring\

Единицы измерения. Объемный расход должен быть задан в SLPМ (стандартные литры в минуту). Давление задается в МПа (SI) или psi (Имперская система единиц)

Для создания файла

- Запустите программу UM;

- Используйте команду основного меню **Инструменты | Элементы пневмосистем | Клапаны контроля высоты...** чтобы открыть окно на рис. 31.37;
- Если необходимо, измените систему единиц
- Подготовьте кривую объемного расхода клапана так же, как это описано для табличных данных пневморессоры в п. 31.2.3.1.3 *Подготовка и ввод табличных данных*. На рис. 31.38 приведен пример оцифровки кривой с помощью программы GetData Graph Digitizer.
- Щелчком на кнопке  откройте редактор кривых и введите данные, рис. 31.39.
- Укажите, какая ветвь кривой соответствует закачке воздуха в систему: положительная абсцисса (левая ветвь) или отрицательная. На рис. 31.34 закачке соответствует отрицательная ветвь.
- Укажите значение избыточного (манометрического) давления, для которого получена кривая объемного потока.

После ввода данных сохраните их в файл *.hcv с помощью кнопки .

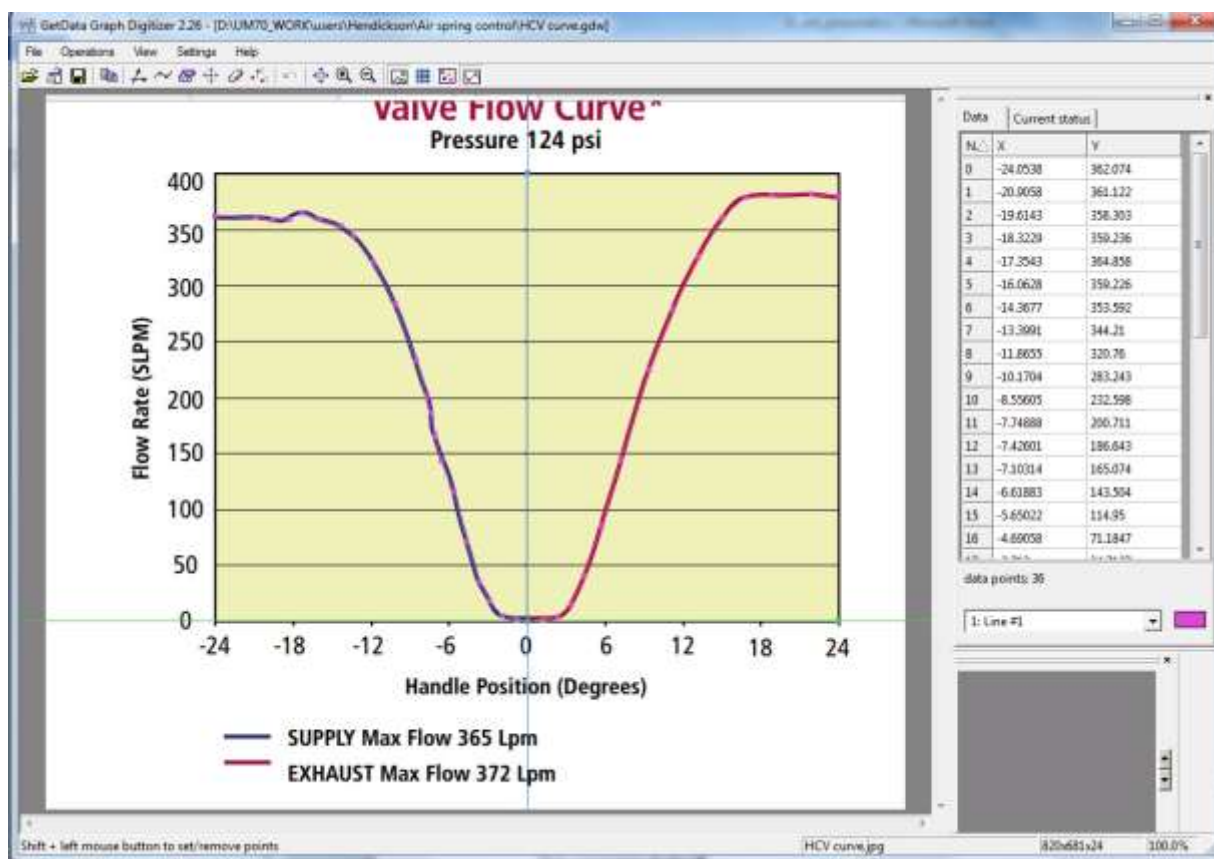


Рис. 31.38. Оцифровка характеристики HCV в программе GetData Graph Digitizer

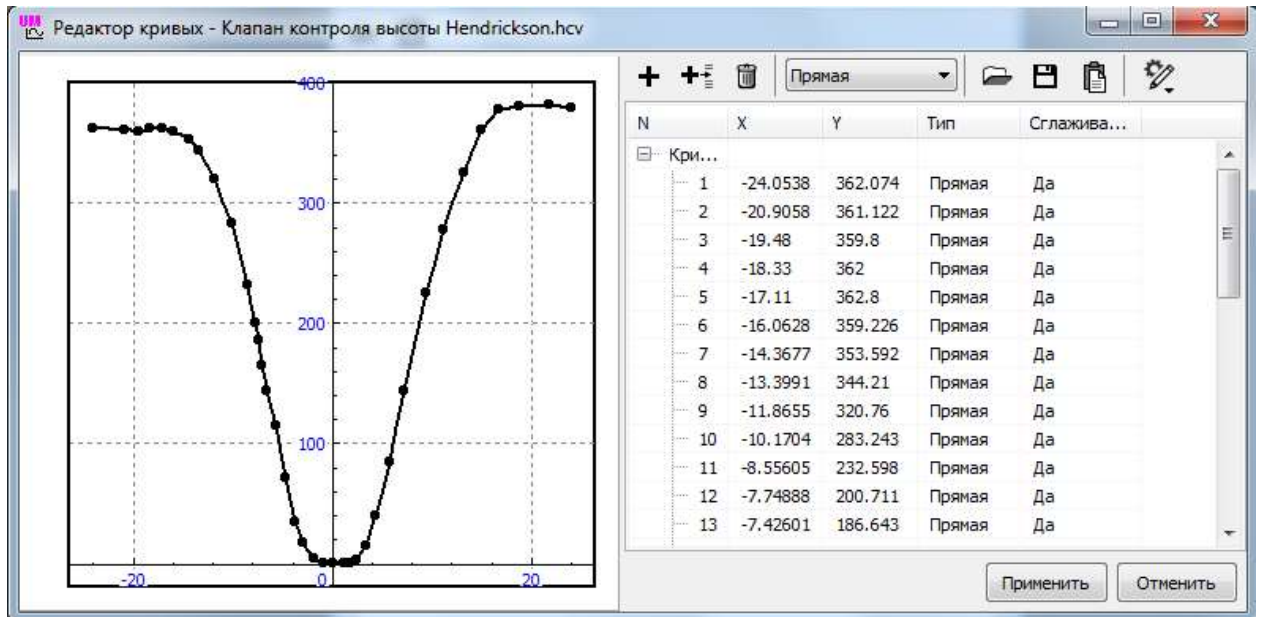


Рис. 31.39. Характеристика HCV в редакторе кривых

31.2.7.2. Клапан регулировки перепада давления (DPCV)

В UM10 добавлена модель клапана DPCV (differential pressure control valve), соединяющего два резервуара и ограничивающего разность давлений резервуаров p_g . Клапан открывается, если разность давлений больше этой величины.

Для расчета потока используется модифицированная модель сопла (31.28)

$$\dot{m} = \begin{cases} AC_d(p_1 - p_g) \sqrt{\frac{2}{RT_1} \psi(r_p)}, & p_1 > p_2 + p_g, \quad r_p = \frac{p_2}{p_1 - p_g} \\ 0, & p_1 < p_2 + p_g \end{cases}$$

Параметры клапана приведены на рис. 31.40. Рекомендуется подбирать параметры диаметра d и коэффициент истечения C_d на основе использования экспериментальных данных. В примере на рис. 31.41 приведено сравнение с экспериментом моделирования процесса истечения воздуха в атмосферу из резервуара объемом 95л через клапан с показателем $p_g = 0.15$ МПа. На основании доступных экспериментальных данных в диссертации доктора Zhuang Qi подобрано значение диаметра $d=5.8$ мм, обеспечивающее хорошее совпадение результатов моделирования (сплошная линия) с экспериментом (маркер). Соответствующая модель находится в каталоге

[{Данные УМ}\SAMPLES\Pneumatics\DPCV](#)

		Камеры	Каналы	Отверстия	HCV	Компрессоры	DPCV		
№	Первый узел	Второй узел	d, мм	Cd	b	Pg,МПа	Невозвратный		
1	Rigid chamber2	Rigid chamber1	5.8	1	0.528	0	0		

Рис. 31.40. Параметры DPCV

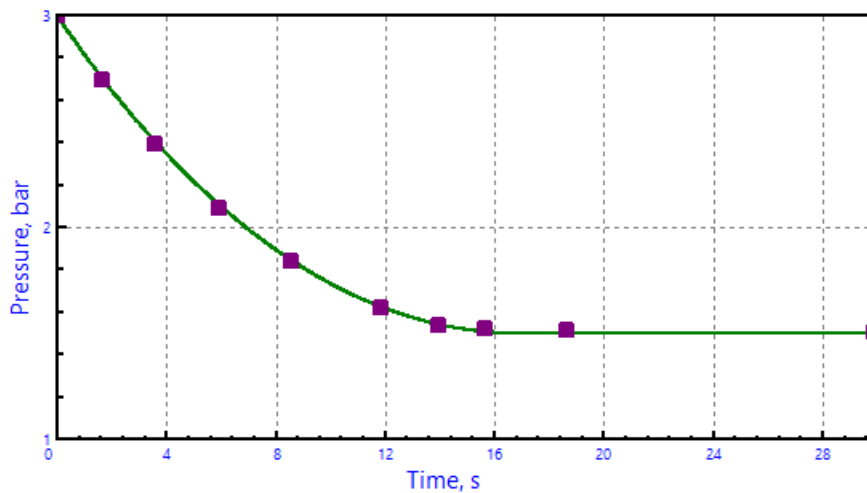


Рис. 31.41. Сравнение расчета DPCV с экспериментом

31.2.7.3. Невозвратный клапан

		Камеры	Каналы	Отверстия	HCV	Компрессоры	DPCV		
№	Первый узел	Второй узел	d, мм	Cd	b	Pg, МПа	Невозвратный		
1	Rigid chamber 2	Rigid chamber 1	5.8	1	0.528	0.05	1		

Рис. 31.42. Параметры невозвратного клапана

Невозвратный клапан реализован как частный случай клапана DPCV. Клапан открывается только для потока из первого резервуара во второй при выполнении условия

$$p_1 > p_2 + p_g, \quad p_g \geq 0.$$

Признаком невозвратного клапана является единица в последней ячейке таблицы, рис. 31.42. Для работы клапана в двух направлениях следует установить 0 в данной ячейке, рис. 31.40.

31.2.8. Компрессоры

Компрессор в UM введен для автоматического поддержания давления в резервуарах. Компрессор включается, если давление в резервуаре меньше заданного значения P_{\min} , и выключается при достижении значения P_{\max} .

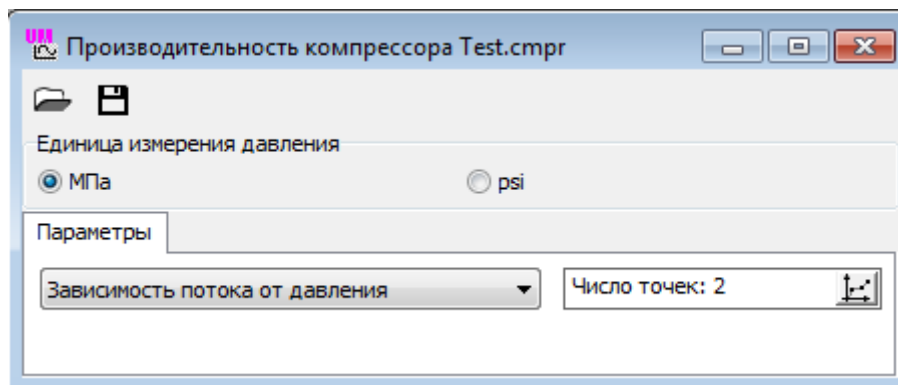



Рис. 31.43. Окно для создания модели компрессора


Модель компрессора включает кривую зависимости объемного потока от давления заполняемого резервуара и должна быть сохранена в виде файла *.cmpr. Эти файлы размещаются в каталоге {Данные UM }\AirSpring, пример:

c:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\2023\AirSpring\

Единицы измерения. Объемный расход должен быть задан в SLM (стандартные литры в минуту). Манометрическое давление задается в МПа (SI) или psi (Имперская система единиц)

Для создания файла:

- Запустите программу UM;
- Используйте команду основного меню **Инструменты | Элементы пневмосистем | Компрессоры...** чтобы открыть окно *Производительность компрессора*, рис. 31.43;
- Если необходимо, измените систему единиц
- Щелчком на кнопке  откройте редактор кривых и введите данные, рис. 31.39.

После ввода данных сохраните их в файл *.cmpr с помощью кнопки .

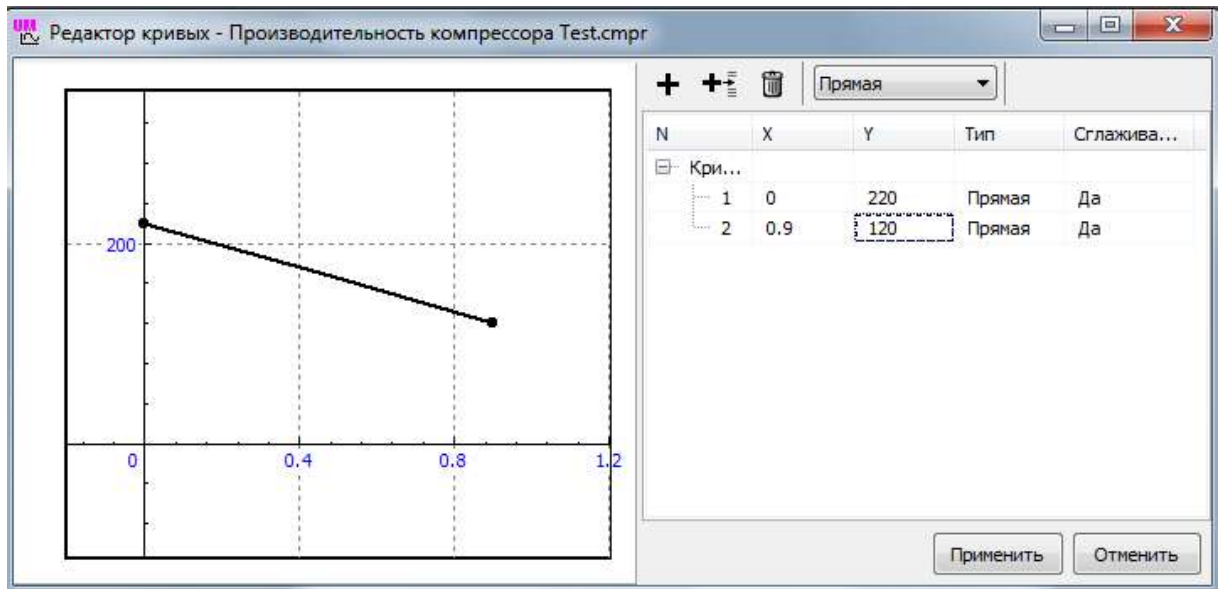


Рис. 31.44. Редактор кривых: зависимость объемного потока от давления

31.3. Пневматические системы

Схема пневматической системы (ПС) в УМ представляется графом, вершины (узлы) которого соединены ребрами. Каждый узел соответствует одному из пневматических элементов

- камера постоянного объема, п. 31.2.2 *Камеры постоянного объема*;
- пневморессора, п. 31.2.3 *Пневморессоры*;
- простой узел (соединение трубок), п. 31.2.4 *Соединения (простые узлы)*.

Ребрам соответствуют

- пневматические трубки, п. 31.2.5 *Пневматические каналы и трубки*;
- отверстия, п. 31.2.6 *Отверстия*;
- клапаны контроля высоты, п. 31.2.7.1.

31.3.1. Параметры табличных пневморессор

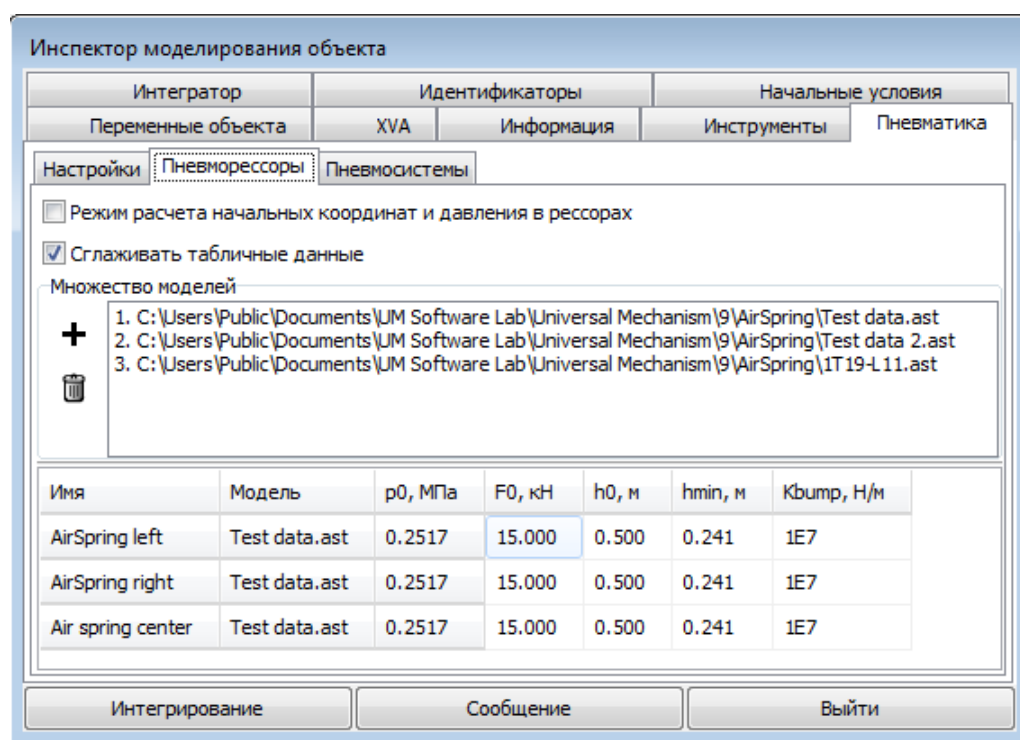


Рис. 31.45. Параметры табличных пневморессор

Для назначения табличных моделей пневморессорам (ПР) и для задания ряда параметров, таких, как статическая высота и силы, используется вкладка **Пневматика | Пневморессоры**, рис. 31.45.

Список силовых элементов, соответствующих табличным ПР, указывается в таблице в нижней части вкладки. Все ПР должны быть описаны как специальные силовые элементы в программе ввода UM Input, п. 31.2.3.1.1 *Параметры пневморессоры в UM Input*.

Файлы *.ast содержат табличные модели ПР, п. 31.2.3.1.3.4 *Создание файлов UM *.ast с табличными моделями пневморессор*. По умолчанию файлы размещаются в каталоге {Данные УМ } \AirSpring.

Множество моделей ПР должно содержать по меньшей мере один элемент. Используйте кнопки **+** и **🗑** для добавления и удаления моделей в списке.

Двойной щелчок на имени файла в списке открывает окно с соответствующей моделью, рис. 31.9.

Имя	Модель	p0, МПа	F0, кН	h0, м	hmin, м	Kbump, Н/м
AirSpring left	Test data.ast	0.203	12.000	0.500	0.241	1E7
AirSpring right	Test data.ast	0.203	12.000	0.500	0.241	1E7
Air spring center	Test data.ast	0.203	12.000	0.500	0.241	1E7

Рис. 31.46. Назначение моделей ПР

Для назначения табличной модели силовому элементу ПР подведите курсор мыши к соответствующему силовому элементу в таблице, щелкните правой кнопкой мыши и выберите табличную модель в контекстном меню, рис. 31.46.

Имя	Модель	p0, МПа	F0, кН	h0, м	hmin, м	Kbump, Н/м
AirSpring left	Test data.ast	0.203	12.000	0.500	0.241	1E7
AirSpring right	Test data.ast	0.203	12.000	0.500	0.241	1E7
Air spring center	Test data.ast	0.203	12.000	0.500	0.241	1E7

Рис. 31.47. Силовые элементы с назначенными табличными моделями и статическими значениями силы и высоты

Установите статические значения силы и высоты F_0, h_0 для каждого силового элемента, рис. 31.47. Соответствующее значение давления p_0 рассчитывается автоматически.

Минимальная высота (hmin) и **коэффициент жесткости упора (Kbump)** для ПР являются важными, если табличная модель не содержит описание ограничителя. Нелинейный ограничитель может быть также описан дополнительным силовым элементом в программе ввода UM Input параллельно с силовым элементом ПР; в таких случаях для параметра **Kbump** должно быть установлено нулевое значение.

Щелкните дважды на силовом элементе с назначенной табличной моделью и статическими параметрами, чтобы получить график силы, объема и давления **при динамическом нагружении**, рис. 31.48, п. 31.2.3.1.4. *Математическая модель пневморессоры при табличном описании.*

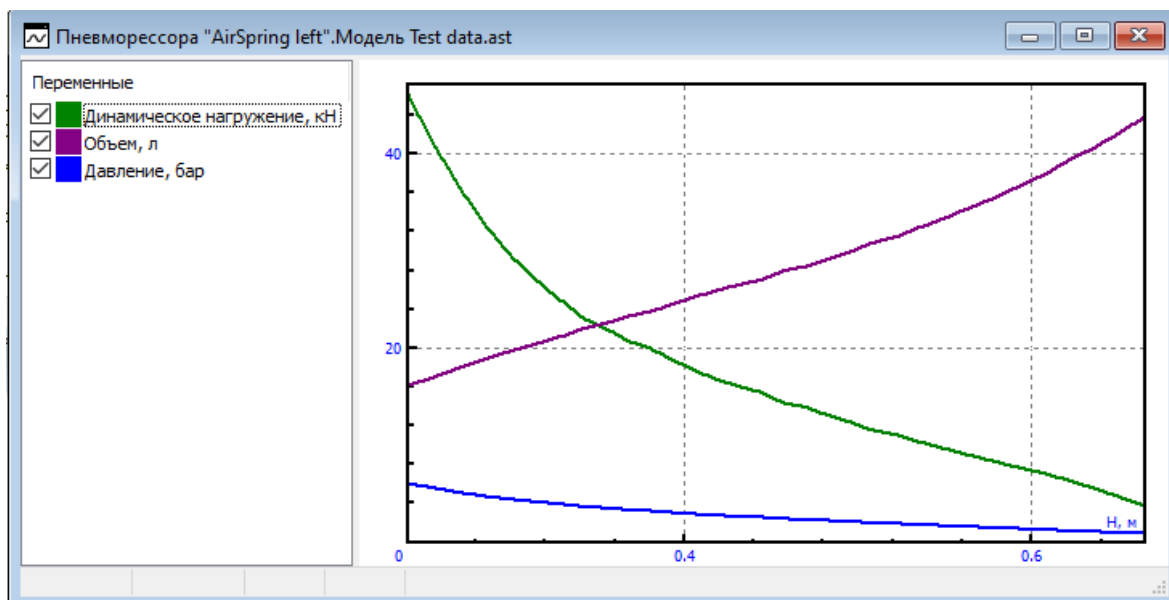


Рис. 31.48. Модель динамического нагружения ПР "Test data.ast"

Опция **Режим расчета начальных координат и давления в рессорах** используется для автоматического расчета давления в ПР в режиме нулевой скорости для обеспечения заданной высоты подвески вагона или автомобиля при наличии клапана HCV, п. 31.4.4.4.3. *Тест с расчетом начальных условий по давлениям и координатам.*

Используйте опцию **Сглаживать табличные данные**

- для интерполяции с помощью В-сплайнов статических табличных данных для силы и объема в зависимости от высоты;
- для квадратичной полиномиальной интерполяции табличных зависимостей силы и объема от давления.

Если ПР *изолированная*, т.е. не связана с другими элементами пневматической системы, ее масса постоянна. В этом случае свойства ПР при моделировании полностью определяются моделью динамического нагружения, рис. 31.48. Если же ПР связана пневмотрубками или отверстиями с другими узлами ПС, ее поведение определяется в соответствии с решением системы нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений в процессе моделирования.

31.3.2. Описание пневматических систем

31.3.2.1. Список пневмосистем

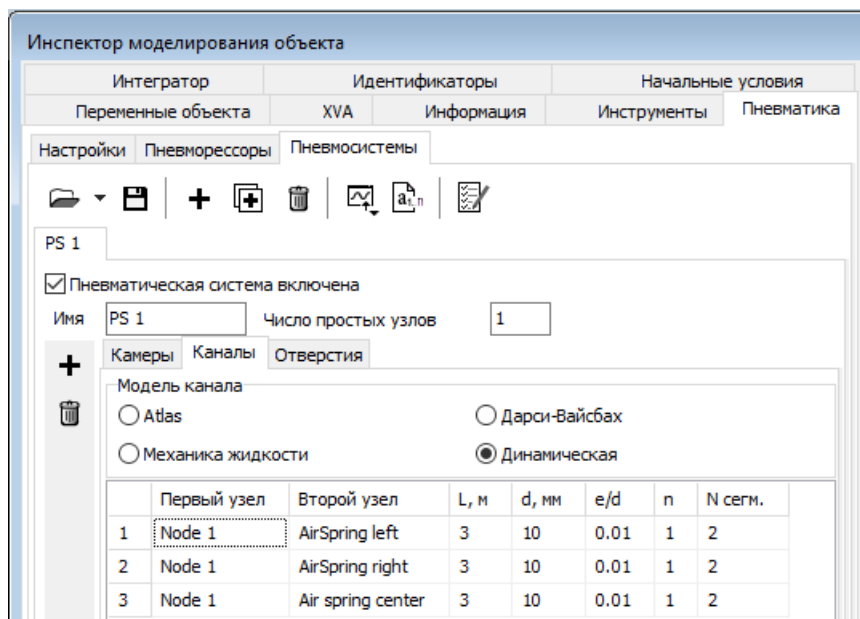



Рис. 31.49. Список пневматических систем

Модель УМ может включать несколько невзаимодействующих пневмосистем (ПС). Кнопки для управления списком ПС, а также для вызова некоторых полезных инструментов, расположены в верхней части вкладки **Пневмосистемы**, рис. 31.49.


 - чтение ранее созданного файла *.psc с описанием списка ПС.

 - запись описания ПС в файл *.psc.


Описание списка ПС сохраняется также в файле конфигурации модели *.icf, в частности, в файле last.icf. Пользователь может сохранить те же самые данные с отдельный файл *.psc, который может быть полезен в ряде случаев.


 - добавить новую ПС к списку.

 - добавить к списку копию текущей ПС.

 - удалить текущую ПС.

 - открыть плейер моделей пневмотрубок и отверстий, п. 31.3.2.3.

 - открыть список пневматических переменных; п. 31.3.2.4 *Список переменных для пневматических элементов.*

 - проверить полноту и корректность описания ПС, п. 31.5.1 *Ошибки создания моделей пневмосистем.*

31.3.2.2. Описание пневматической системы

31.3.2.2.1. Общие параметры пневмосистемы

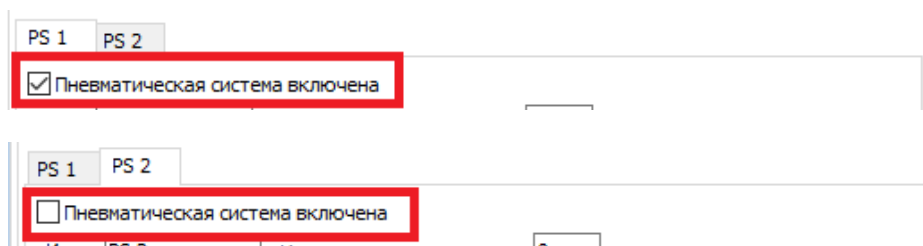


Рис. 31.50. Включенная и выключенная ПС

Каждая ПС в списке может быть либо **активной (включенной)** либо **выключенной**. Текущая ПС включена, если соответствующая опция помечена галочкой, рис. 31.50. Включение/выключение ПС предоставляет пользователю простой инструмент для сравнения различных вариантов ПС.

- Замечание 1** Если пользователь описал в модели несколько ПС, ему следует помнить, что активные ПС должны быть *полностью пневматически независимы друг от друга*. В частности, табличная ПР может быть связана только с одной активной ПС.
- Замечание 2** Если табличная ПР связана только с выключенными ПС или вообще не связана ни с одной ПС, она рассматривается как изолированная, и ее свойства при моделировании полностью определяются моделью динамического нагружения, рис. 31.48.

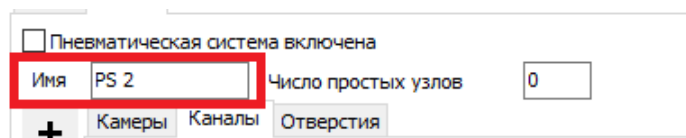


Рис. 31.51. Имя ПС

Имя ПС идентифицирует ее в случае, когда модель включает несколько ПС, рис. 31.51.

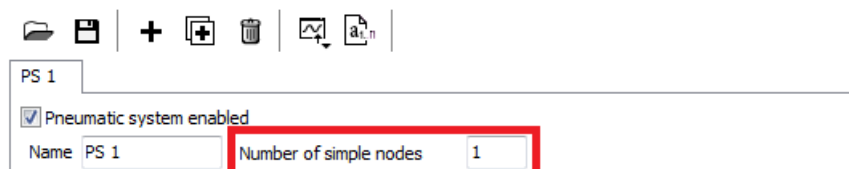


Рис. 31.52. Число простых узлов

Установите число простых узлов (соединений трубок), если такие элементы присутствуют в текущей ПС, рис. 31.52, п. 31.2.4 *Соединения (простые узлы)*.

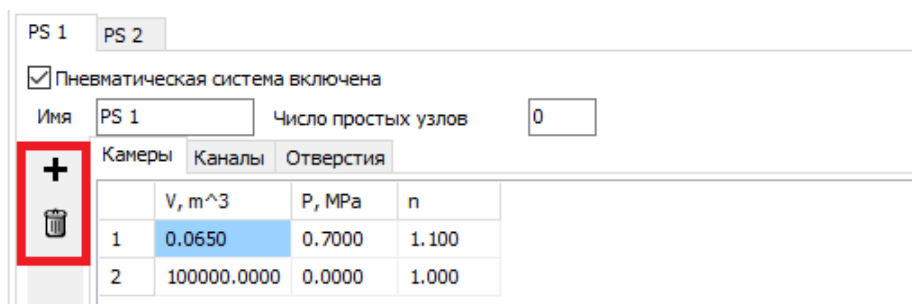


Рис. 31.53. Кнопки для добавления и удаление пневматических элементов

Списки пневматических элементов, за исключением пневморессор, создаются динамически как часть ПС. Стандартные кнопки используются для добавления и удаления элементов списков камер, трубок и отверстий, рис. 31.53.

31.3.2.2.2. Список камер с постоянным объемом

Описание камер данного типа содержит следующие численные параметры, рис. 31.53:

- объем V , m^3
- начальное давление P , МПа
- индекс политропы, n .

Замечание Для описания соединения ПС с источником постоянного давления, например, с окружающей средой, используется камера с большим объемом, см. вторую камеру на рис. 31.53.

31.3.2.2.3. Список каналов (пневмотрубок)

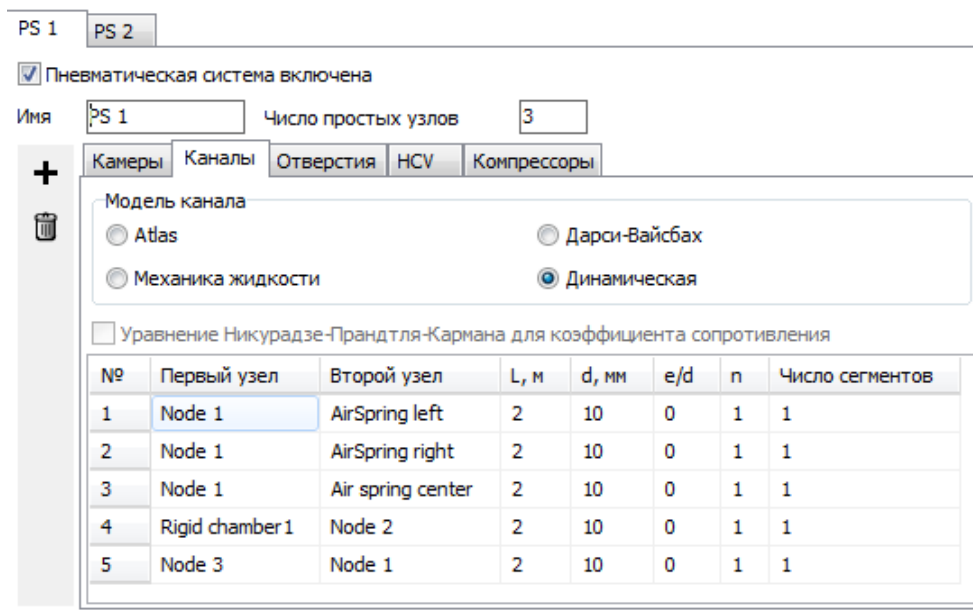


Рис. 31.54. Добавленная пневмотрубка

Следует выбрать **модель каналов и пневмотрубок**, рис. 31.54, п. 31.2.5. *Пневматические каналы и трубки.*

В таблице для каждой трубки следует задать следующие численные параметры:

- Длина L , м
- диаметр d , мм
- относительную шероховатость e/d (используется для модели Дарси-Вайсбаха и динамической модели, п. 31.2.5.1.3 *Уравнение Дарси-Вайсбаха*, 31.2.5.2 *Динамическая модель пневмотрубки*)
- индекс политропы n и число сегментов N используются только в динамической модели, п. 31.2.5.2 *Динамическая модель пневмотрубки*.

Для назначения узлов, соединяемых трубкой, используйте двойной щелчок левой кнопки мыши на поле и выберите узел из списка, рис. 31.55. Узел можно заменить таким же способом.

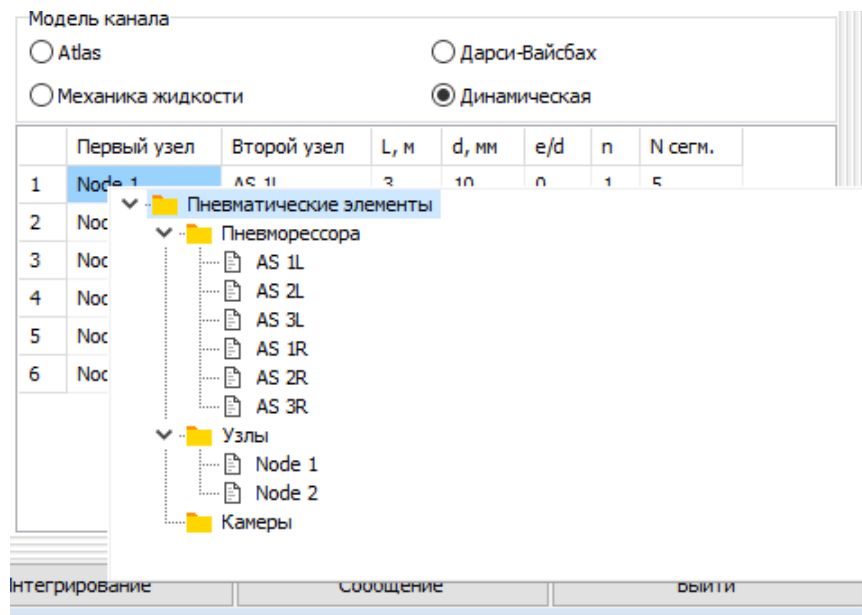


Рис. 31.55. Назначение узла для трубки

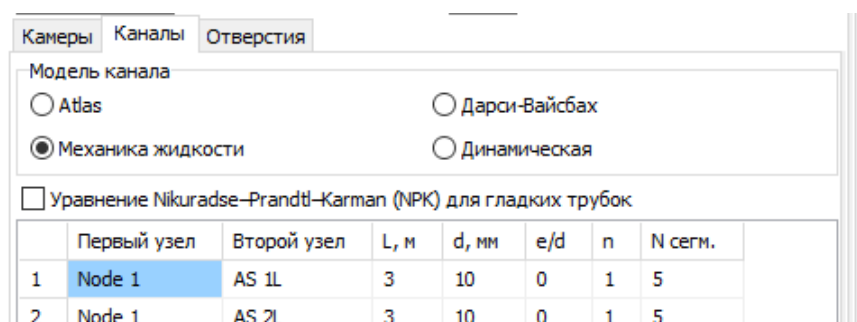


Рис. 31.56. Дополнительная опция для выбора сопротивления в случае модели трубки "Механика жидкости"

Если включена опция **Уравнение Nikuradse–Prandtl–Karman (NPK) для гладких трубок**, то используется уравнение NPK для коэффициента сопротивления трубки (31.17), в противном случае применяется уравнение Блазиуса (31.16). Данная опция применяется только для модели трубки "Механика жидкости".

31.3.2.2.4. Список отверстий

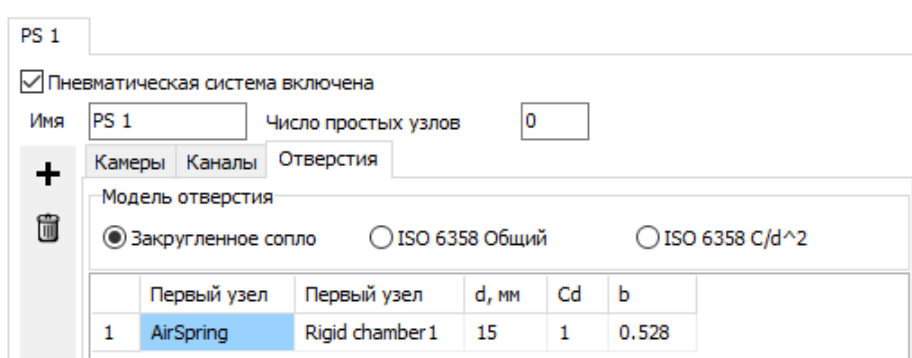


Рис. 31.57. Список отверстий

Пользователь может задать модель отверстия, рис. 31.57, см. п. 31.2.6 *Отверстия*, а также численные параметры для каждого отверстия:

- диаметр, мм
- в зависимости от типа модели отверстия
 - коэффициент истечения C_d (закругленное сопло),
 - проводимость C (стандарт ISO 6358),
 - отношение C/d^2 (ISO 6358 C/d^2)
- критическое отношение давлений b .

Узлы, соединяемые отверстием, назначаются двойным щелчком на поле , рис. 31.55.

31.3.2.2.5. Список клапанов HCV

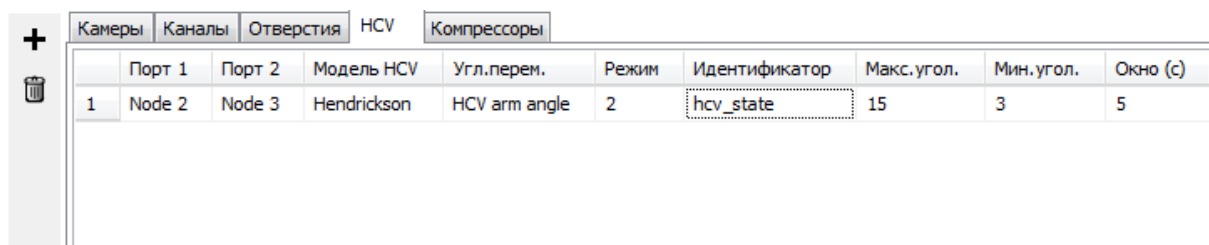


Рис. 31.58. Список клапанов контроля высоты

Вкладка HCV появляется только в том случае, если программа находит хотя бы одну модель клапана контроля высоты в каталоге {Данные УМ } \AirSpring, п. 31.2.7.1.3 *Создание файла UM *.hcv с моделью клапана HCV*. При щелчке на кнопке **+** в модель добавляется клапан, которому автоматически назначается одна из моделей из данного каталога, рис. 31.59.

Камеры		Каналы		Отверстия		HCV		Компрессоры	
Порт 1	Порт 2	Модель HCV	Угл.перем.	Режим	Идентификатор	Макс.угол.	Мин.угол.	Окно (с)	
1	Node 2	Node 3	Hendrickson	HCV arm angle	2	hcv_state	15	3	5
2	---	---	Hendrickson	(нет)	0		15	3	5

Рис. 31.59. Добавленный клапан

Для добавленного клапана следует ввести следующие данные.

Порт 1. Узел, соответствующий линии, связывающей клапан с резервуаром высокого давления, либо непосредственно резервуар.

Порт 2. Узел, соответствующий линии, связывающей клапан с пневмосистемой.

Узлы назначаются двойным щелчком на поле , рис. 31.55.

Модель HCV. В таблице указывается имя файла *.hcv с моделью клапана. Для выбора другого файла или модификации выбранного следует дважды щелкнуть мышкой на этом поле таблицы. Затем в появившемся окне прочитать другую модель или модифицировать данную, п. 31.2.7.1.3 *Создание файла UM *.hcv с моделью клапана HCV*. После закрытия окна следует подтвердить модификацию модели.

Угл.перем. (Угловая переменная) В данное поле таблицы следует перетащить мышкой переменную, созданную в Мастере переменных, п. 31.4.4.3 *Создание переменной – угол поворота рычага*. Переменная должна соответствовать абсциссе кривой объемного потока клапана, см. рис. 31.36.

Режим. Целое число, соответствующее режиму работы клапана. Устанавливается перед запуском процесса моделирования. Реализовано три режима работы клапана.

0 – клапан выключен, то есть порты закрыты.

1 – основной режим: клапан включен, и поток воздуха определяется положение рычага управления.

2 – режим автоматического включения и выключения клапана. Описание режима см. ниже.

Идентификатор. Пользователь может назначить идентификатор, параметризующий режим работы клапана. Идентификатор назначается из списка идентификаторов модели двойным щелчком на поле таблицы. Идентификатор может использоваться для переключения режимов клапана с помощью инструмента *Управление идентификаторами* или с использованием средств UM Control (Matlab Import, SimInTech Import).

Макс.угол α_{max} (Максимальный угол) В режиме автоматической работы клапан включается, если угол поворота рычага по абсолютной величине *больше* заданного значения α_{max} в течение интервала времени T_w , заданного в поле **Окно**.

Мин.угол α_{min} (Минимальный угол) В режиме автоматической работы клапан выключается, если угол поворота рычага *меньше* заданного значения α_{min} .

Окно (с) Параметр T_w используется в режиме автоматической работы. Клапан включается, если угол поворота рычага по абсолютной величине *больше* α_{max} в течение интервала времени, заданного T_w .

Режим автоматической работы клапана.

В поле **Режим** следует установить значение 2. Моделирование начинается при выключенном клапане. На каждом шаге моделирования программа проверяет угол поворота рычага управления α . Если $|\alpha| > \alpha_{\max}$, то включается режим ожидания включения клапана. Если режим ожидания длится больше T_w , то клапан включается. Режим ожидания сбрасывается, если $|\alpha| < \alpha_{\max}$ и время с момента перехода в этот режим меньше T_w . Выключение клапана происходит в момент $|\alpha| < \alpha_{\min}$.

31.3.2.2.6. Список компрессоров

Резервуар	Модель компрессора	Pmin, МПа	Pmax, МПа
1 Rigid chamber 1	Test psi	0.7	0.9

Рис. 31.60. Список компрессоров

Вкладка **Компрессоры** появляется только в том случае, если программа находит хотя бы одну модель компрессора в каталоге {Данные УМ } \AirSpring, п. 31.2.8. *Компрессоры*. При щелчке на кнопке **+** в модель добавляется компрессор, которому автоматически назначается одна из моделей из данного каталога, рис. 31.60.

Резервуар	Модель компрессора	Pmin, МПа	Pmax, МПа
1 Rigid chamber 1	Test psi	0.7	0.9
2 ---	Test psi	0.6	0.8

Рис. 31.61. Добавленный компрессор

Для добавленного компрессора следует ввести следующие данные.

Резервуар. Камера постоянного объема, к которой присоединен компрессор.


Резервуар назначается двойным щелчком на поле , рис. 31.55.

Модель компрессора. В таблице указывается имя файла *.cmpr с моделью компрессора. Для выбора другого файла или модификации выбранного следует дважды щелкнуть мышкой на этом поле таблицы. Затем в появившемся окне прочитать другую модель или модифицировать данную. После закрытия окна следует подтвердить модификацию модели.

Pmin. Манометрическое давление в резервуаре, при котором начинается его заполнение.

Pmax. Манометрическое давление в резервуаре, при котором прекращается его заполнение.

31.3.2.3. Инструмент для тестирования моделей пневмотрубок и отверстий

Щелкните на кнопке  (Рис. 31.49), чтобы открыть окно для графического сравнения массовых расходов различных стационарных моделей пневмотрубок и отверстий, а также для тестирования динамической модели пневмотрубок, рис. 31.63. Пользователь может изменять значения параметров в правой таблице и обновлять графики щелчком на кнопке **Построить графики**.

31.3.2.3.1. Стационарные модели каналов (пневмотрубок)

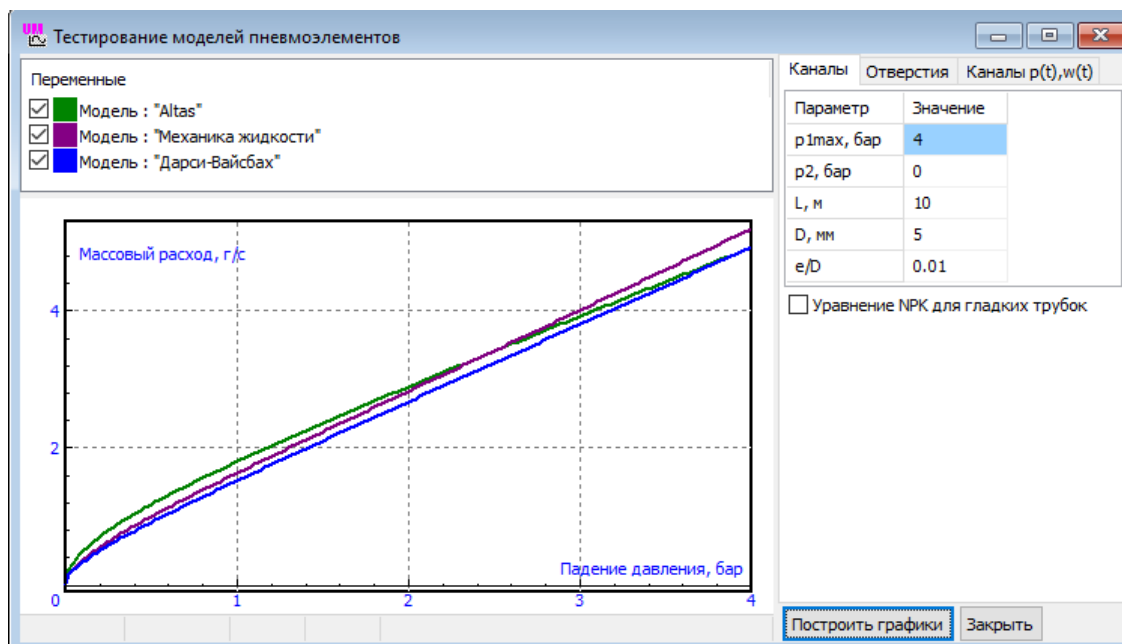


Рис. 31.62. Сравнение стационарных моделей каналов (пневмотрубок)

Манометрическое давление указывается в таблице и на графике в барах. Зависимость массового расхода от падения давления $\Delta p = p_1 - p_2$ рассчитывается для заданного значения давления p_2 и различных значений $p_1 > p_2$.

Относительная шероховатость e/D используется для модели Дарси-Вайсбаха, п. 31.2.5.1.3.

Опция **Уравнение НРК для гладких трубок** применяется к модели "Механика жидкости", п. 31.2.5.1.2. Если опция не включена, то используется уравнение Блазиуса для коэффициента сопротивления.

31.3.2.3.2. Модели отверстий

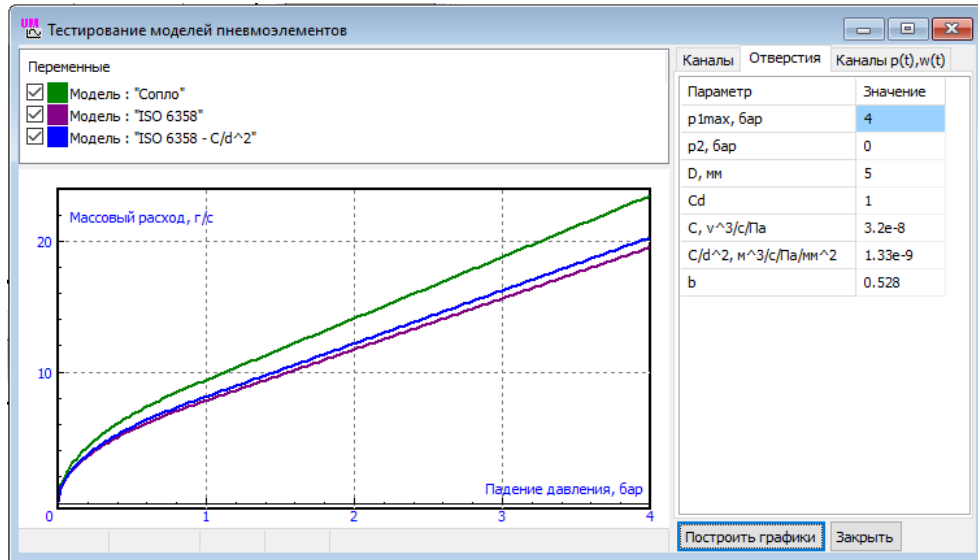


Рис. 31.63. Сравнение моделей отверстия

Манометрическое давление указывается в таблице и на графике в барах. Зависимость массового расхода от падения давления $\Delta p = p_1 - p_2$ рассчитывается для заданного значения давления p_2 и различных значений $p_1 > p_2$.

Cd - коэффициент истечения в модели "Сопло", п. 31.2.6.1.

C - стандартная проводимость в модели отверстия "ISO 6358", п. 31.2.6.2.

C/d² - значение C/d^2 в модели ограничения, предложенной в [13], [14].

31.3.2.3.3. Инструмент для тестирования динамической модели трубки

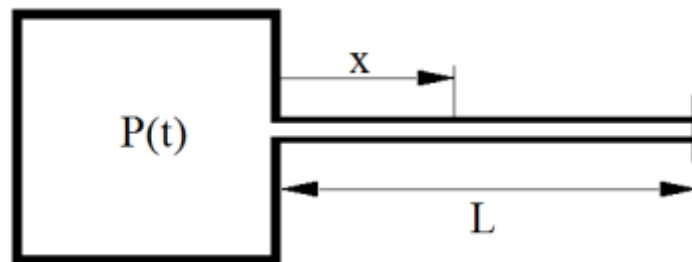


Рис. 31.64. Модель, использованная в инструменте для тестирования динамической модели трубки

В данном инструменте мы реализовали модель возбуждения воздуха в трубке, изображенную на рис. 31.64. Давление в камере является заданной функцией времени $p(0) = P(t)$, а давление в правой закрытой части трубки $p(L)$ рассчитывается в соответствии с динамической моделью, описанной в п. 31.2.5.2.

Пользователь может выбрать тип возмущения из выпадающего списка.

1. **Ступенчатое возмущение** $P(t) = P_0(1 - e^{-t/T_s})$, рис. 31.65. T_s - малая постоянная времени, задающая гладкую аппроксимацию ступенчатой функции. Уменьшение этой по-

стоянной увеличивает темп нарастания давления в камере, см. переменную **Давление слева** на рис. 31.65. Переменная **Давление справа** - это давление в правом закрытом конце трубки.

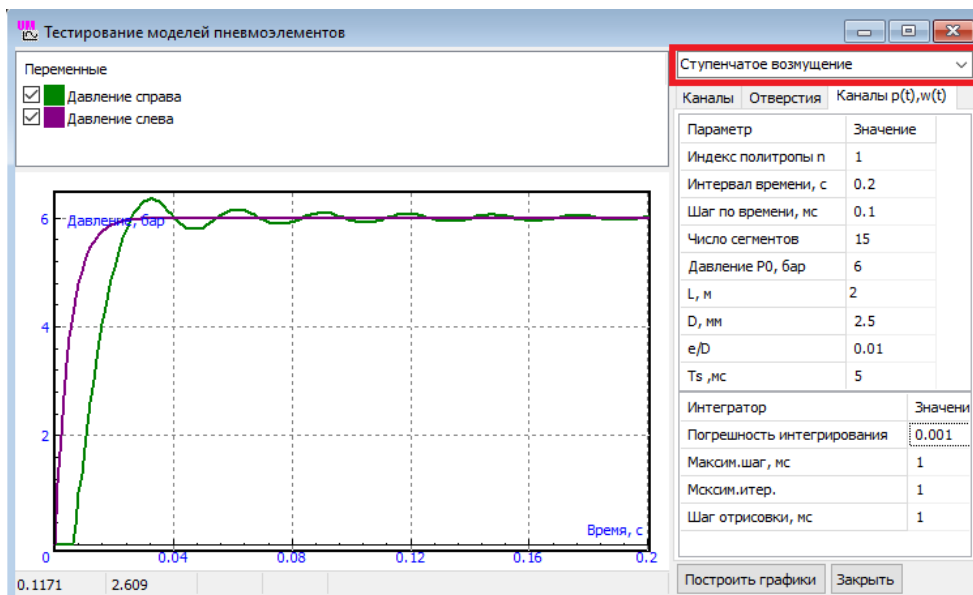


Рис. 31.65. Отклик на ступенчатое возмущение

2. **Частотное возмущение** $P(t) = P_0 + \Delta P \sin(2\pi(f_0 + \epsilon t/2)t)$. Эта модель соответствует гармоническому возмущению со скольльзящей частотой, в котором частота возрастает со скоростью ϵ , $f = f_0 + \epsilon t$ Гц. Параметр ΔP соответствует строке **Амплитуда возмущения** в таблице, рис. 31.66.

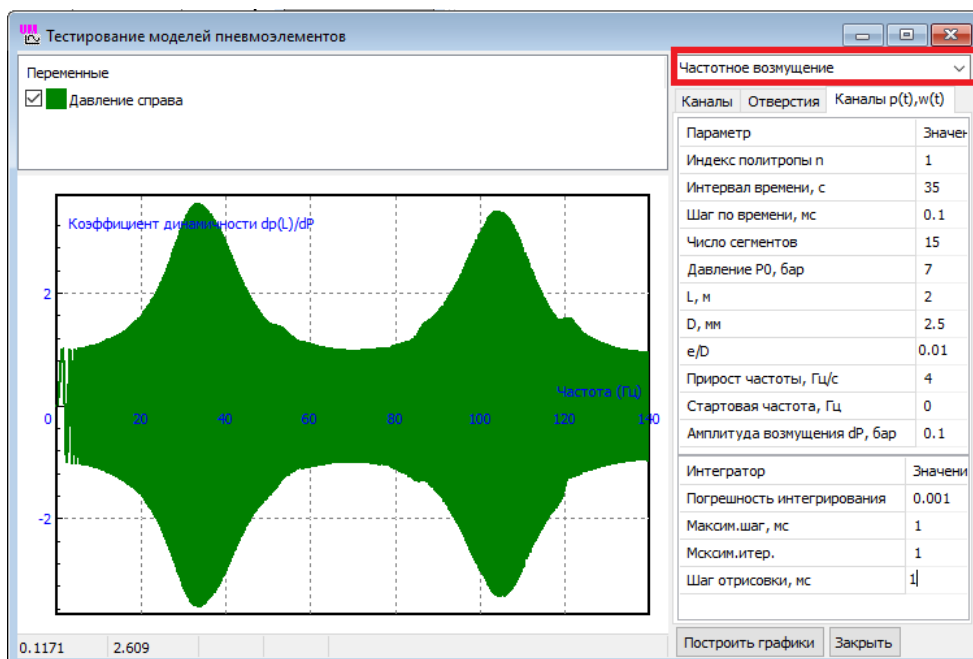


Рис. 31.66. Частотный отклик

Пользователь может задать чисто гармоническое возмущение на одной частоте, наподобие рис. 31.67, задав нулевое значение скорости прироста частоты и указав частоту возмущения параметром **Стартовая частота** f_0 .

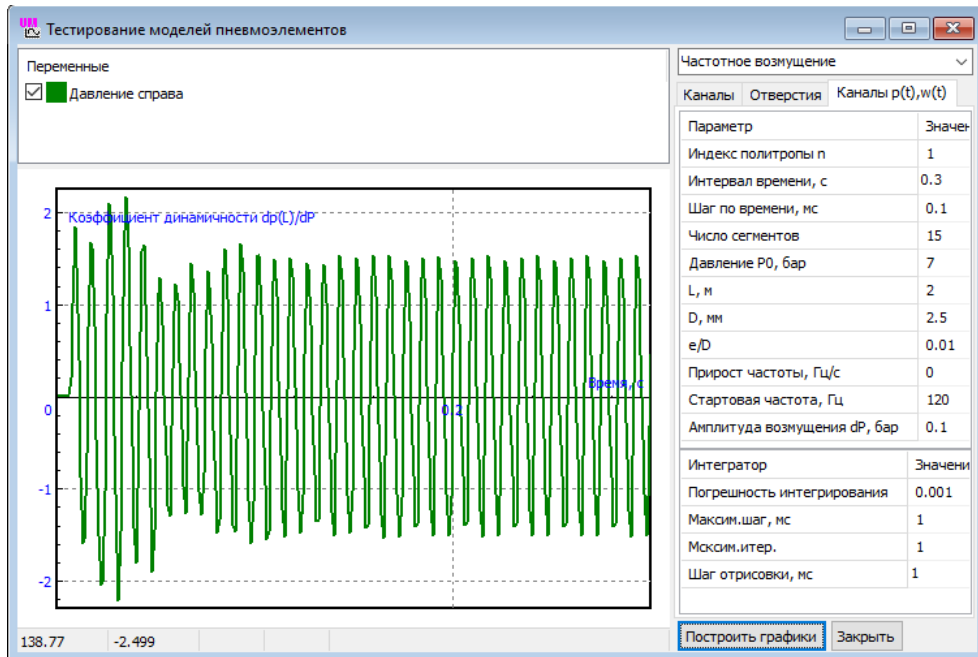



Рис. 31.67. Отклик на чисто гармоническое возмущение 120 Гц

31.3.2.4. Список переменных для пневматических элементов

Щелчком на кнопке  (рис. 31.49) открывается список переменных для пневматических элементов, рис. 31.68.

Пользователь может

- выбрать систему единиц: СИ или Имперская, таблица 2;
- добавить новые страницы с переменными, сгенерированными с помощью Мастера переменных;
- сохранить список в файл;
- перетащить переменные из списка в графическое окно.

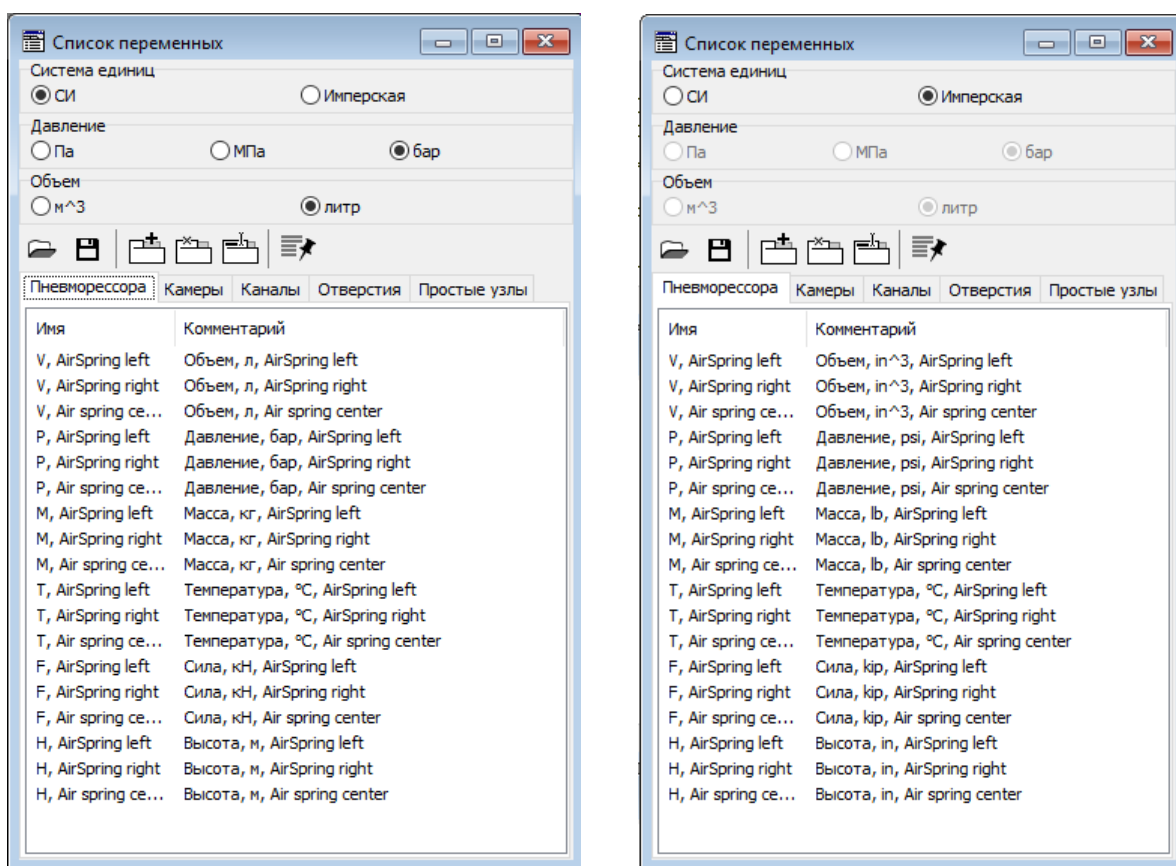


Рис. 31.68. Список пневматических переменных в СИ и Имперской системе единиц

Таблица 2. Единицы измерения

Система единиц	Высота	Сила	Давление	Объем
СИ	м	Н, кН	Па, МПа, бар	м ³ , литр
Имперская	in	kip	psi	in ³

31.3.3. Общие настройки моделирования пневмосистем

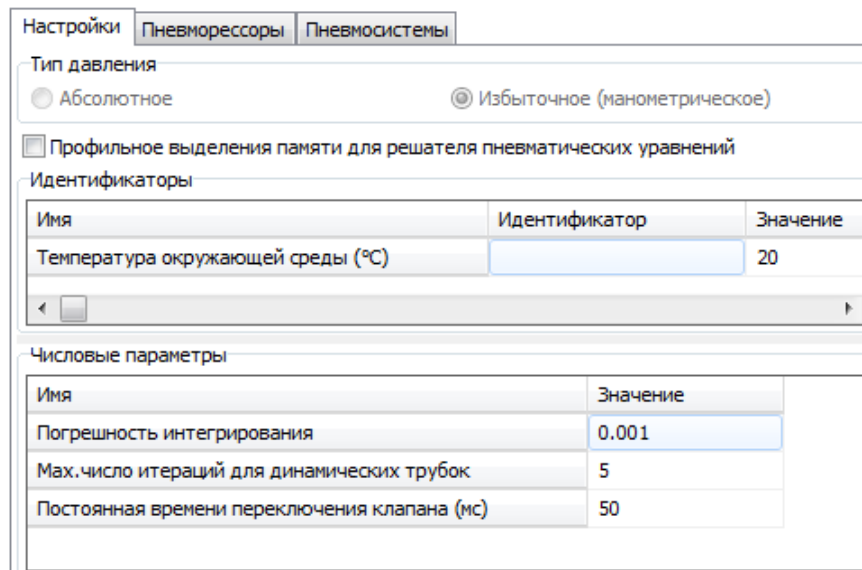


Рис. 31.69. Настройки моделирования пневмосистем

На вкладке **Настройки** представлены некоторые общие параметры и опции моделирования пневмосистем.

Тип давления

Используется избыточное (манометрическое) давление в данных, вносимых в таблицах описания элементов пневмосистем. Как правило, давление указывается в МПа.

Профильное выделения памяти для решателя пневматических уравнений

Включение данной опции позволяет уменьшить объем памяти, выделяемой программой в случае динамических моделей пневматических трубок. Опция имеет временный характер и может быть скрыта в дальнейшем.

Температура окружающей среды

Параметр используется при расчете пневмосистем.

Погрешность интегрирования

Параметр точности решения динамических уравнений пневмотрубок. Не рекомендуется уменьшать данное значение в силу возможной расходимости численных методов.

Максимальное число итераций для динамических трубок

Параметр учитывается, если используется динамическая модель пневмотрубок. Увеличение числа итераций может стабилизировать численное интегрирование в случае расходимости.

Постоянная времени переключения клапана

Интервал времени, соответствующий сглаживанию интенсивности потока при переключении клапана. Сглаживание осуществляется с использованием функции `step`, рис. 31.70. Увеличение интервала позволяет стабилизировать численные методы в случае расходимости.

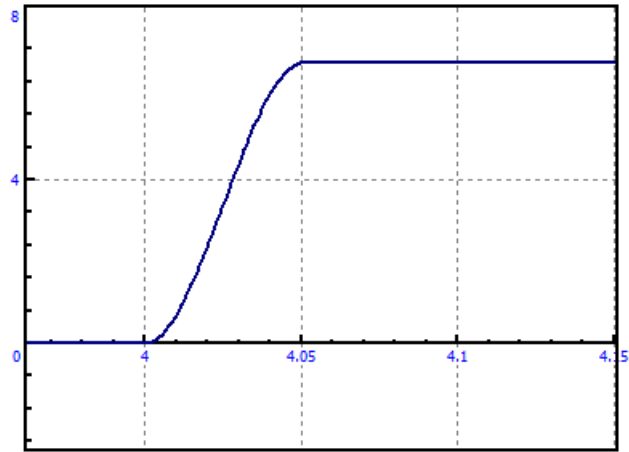


Рис. 31.70. Пример сглаживания потока с помощью функции `step` на интервале 50 миллисекунд

31.3.4. Расчет начальных давлений для моделей с клапанами HCV

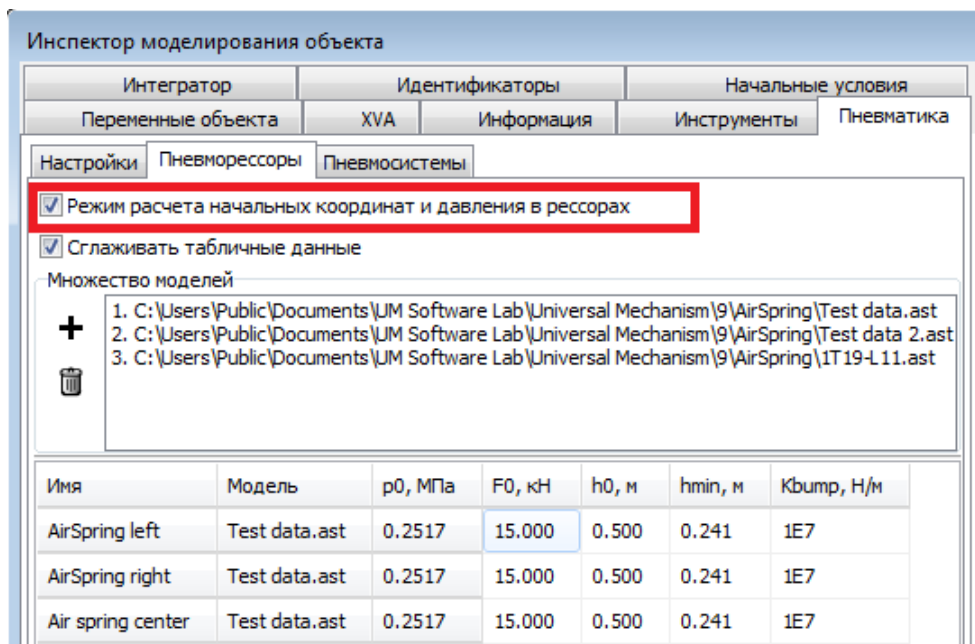


Рис. 31.71. Опция расчета начальных давлений в пневморессорах

Для автомобильных и железнодорожных моделей пользователю доступен специальный режим начальных давлений в пневморессорах и вспомогательных резервуарах, рис. 31.71. Этот режим связан с тестами расчета положения равновесия модели.

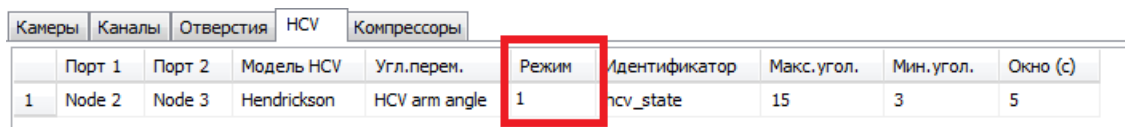


Рис. 31.72. Режим работы клапана

Данный расчет позволяет автоматически определить и назначить в качестве начальных значений давления в пневморессорах для заданного значения нагрузки и высоты подвески. Расчет выполняется под управлением клапана HCV. Режим клапана должен быть либо 1, либо 2, рис. 31.72.

Для данного режима не рекомендуется использовать динамические модели пневмотрубок, если используется клапан HCV большой производительности. Сообщение

PS Sim: Отрицательное давление. Прерывание
или

Шаг интегрирования слишком мал. Прерывание
указывают на расходимость численных методов в случае динамических моделей пневмотрубок. Рекомендуется использовать одну из стационарных моделей (п. 31.2.5.1 *Стационарные модели пневмотрубок*) или увеличить значение параметра **Постоянная времени переключения клапана** (п. 31.3.3 *Общие настройки моделирования пневмосистем*).

В случае принятия результатов теста, рассчитанные значения давлений следует сохранить в конфигурационном файле (*.icf) а начальные координаты тел – в файле начальных значений координат (*.xv). Рекомендуется использовать команду основного меню **Файл | Сохранить конфигурацию | Все настройки**.

Некоторые детали метода для автомобильных и железнодорожных моделей рассмотрены ниже.

31.3.4.1. Расчет начальных давлений для автомобильных моделей

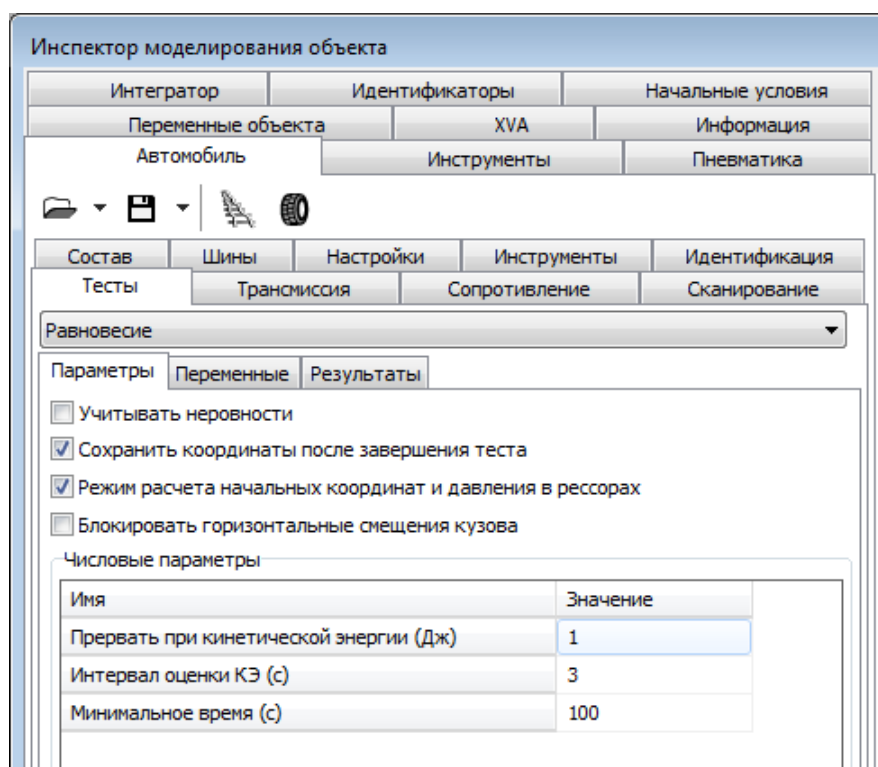


Рис. 31.73. Настройки и параметры теста равновесия автомобиля

Для модели автомобиля следует установить тест равновесия, рис. 31.73. Следующие настройки и значения параметров требуются или рекомендуются.

- Следует включить опцию **Режим расчета начальных координат и давлений в рессорах**. Эта опция синхронизирована с опцией на рис. 31.71.
- Рекомендуется включение опции **Сохранить координаты после завершения теста**.
- Значение параметра **Минимальное время** следует увеличить до значения, необходимого для достижения заданной высоты подвески. Значение зависит от производительности клапана.
- Рекомендуется увеличить значение параметра **Прервать при кинетической энергии** по сравнению со значением по умолчанию.
- Значение времени моделирования на вкладке **Интегратор** должно быть больше, чем значение параметра **Минимальное время**, например, 200с.

Моделирование может быть как остановлено автоматически, так и прервано пользователем.

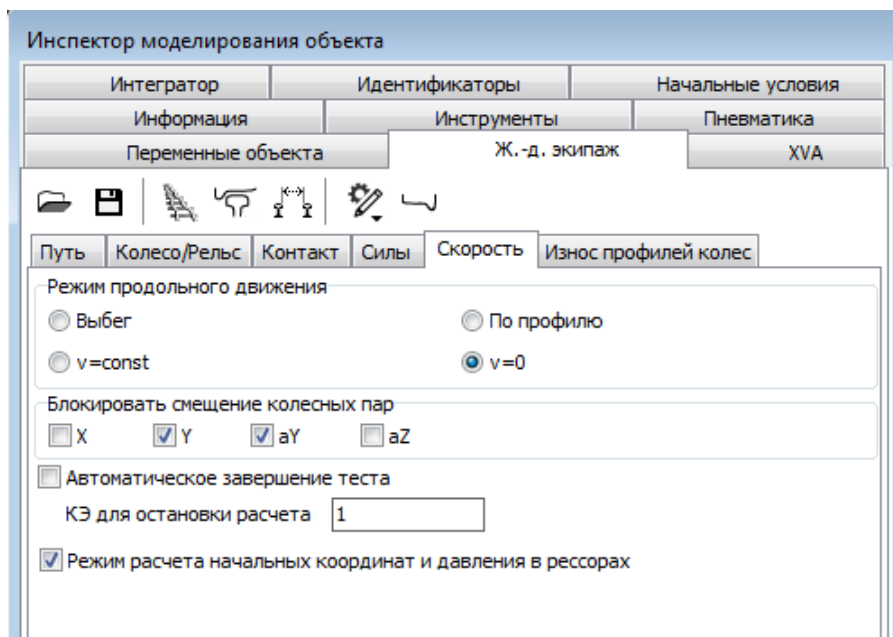
31.3.4.2. Расчет начальных давлений для железнодорожных моделей

Рис. 31.74. Настройки теста равновесия для железнодорожного экипажа

В режиме продольного движения следует установить нулевую скорость (режим расчета равновесия), рис. 31.74.

- Следует включить опцию **Режим расчета начальных координат и давлений в рессорах**. Эта опция синхронизирована с опцией на рис. 31.71.
- Опция **Автоматическое завершение теста** будет проигнорирована.
- Время моделирования на вкладке **Интегратор** должно быть достаточно большим, например, 200с.

Процесс расчета может быть остановлен пользователем при достижении желаемого значения высоты подвески.

31.4. Тесты и примеры

В этом разделе мы рассматриваем модели ПС, которые созданы на основании публикаций других авторов. Мы выбрали ряд публикаций, которые содержат полную информацию о ПС, а также экспериментальные результаты. Основываясь на этих данных, мы разработали UM модели ПС и сравнили результаты моделирования с экспериментальными результатами из публикаций.

31.4.1. Зарядка и разрядка баков

31.4.1.1. Тест 1: Разрядка

Модель

[{Данные УМ}\SAMPLES\Pneumatics\Discharge](#)

соответствует статье [15], в которой представлены экспериментальные данные для разрядки бака. Расчетное значение проводимости дано для двух клапанов (V1, V2). Сравнение моделирования UM (сплошная линия) и экспериментальных данных представлено на рис. 31.75. График соответствует зависимости падения давления от времени. Параметры ПС сохранены в файлах

Valve1.psc

Valve2.psc

в каталоге модели.

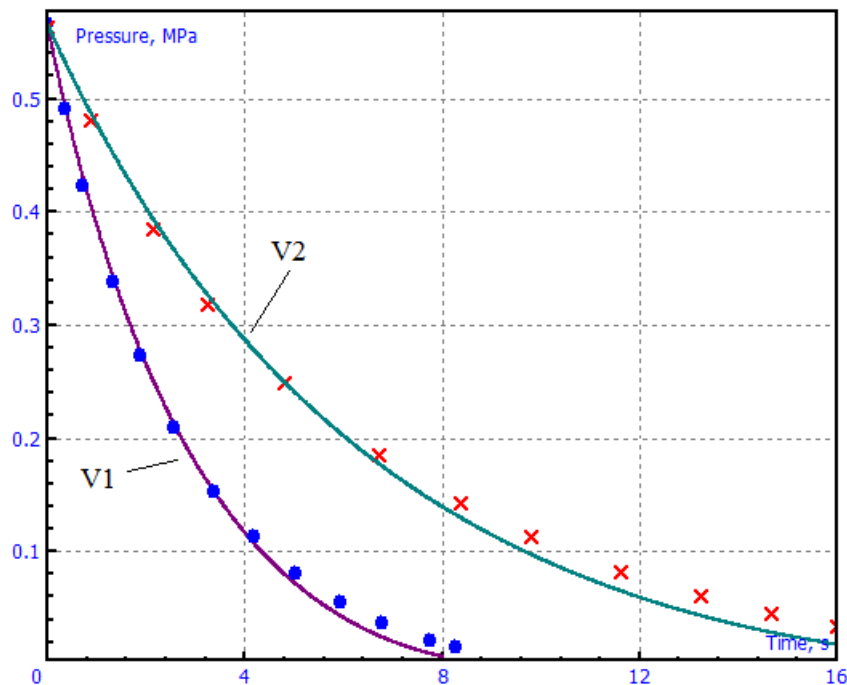


Рис. 31.75. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных по разрядке бака

Модель ПС содержит две камеры постоянного объема, рис. 31.76: первый соответствует баку объемом 10.6л, а второй с очень большим объемом соответствует окружающей

среде (постоянное давление). Отверстие соединяет камеры и моделирует клапан. Для моделирования отверстия используется стандарт ISO 6358; Значение диаметра отверстия в данном тесте игнорируется, постольку модель отверстия полностью определяется значением проводимости.

Таким образом, данный пример иллюстрирует

- хорошее совпадение моделирования с экспериментом;
- моделирование источника постоянного давления камерой большого объема.

Камеры			
	V, м ³	P, МПа	n
1	0.0106	0.5660	1.300
2	100000.0000	0.0000	1.000

Камеры Каналы Отверстия					
Модель отверстия					
<input type="radio"/> Закругленное сопло <input checked="" type="radio"/> ISO 6358 Общий <input type="radio"/> ISO 6358 C/d ²					
	Первый узел	Первый узел	d, мм	C (м ³ /с/Па)	b
1	Rigid chamber2	Rigid chamber 1	10	2.57E-008	0.28

Рис. 31.76. Камеры постоянного объема и соединяющее их отверстие

Как повторить тест?

1. Откройте модель
2. [{Данные УМ}\SAMPLES\Pneumatics\Discharge](#) в программе UM Simulation.
2. Загрузите результаты эксперимента в графическое окно из двух текстовых файлов
P Valve 1 (experiment).txt,
P Valve 2 (experiment).txt
с использованием контекстного меню, рис. 31.77.
3. Запустите моделирование.

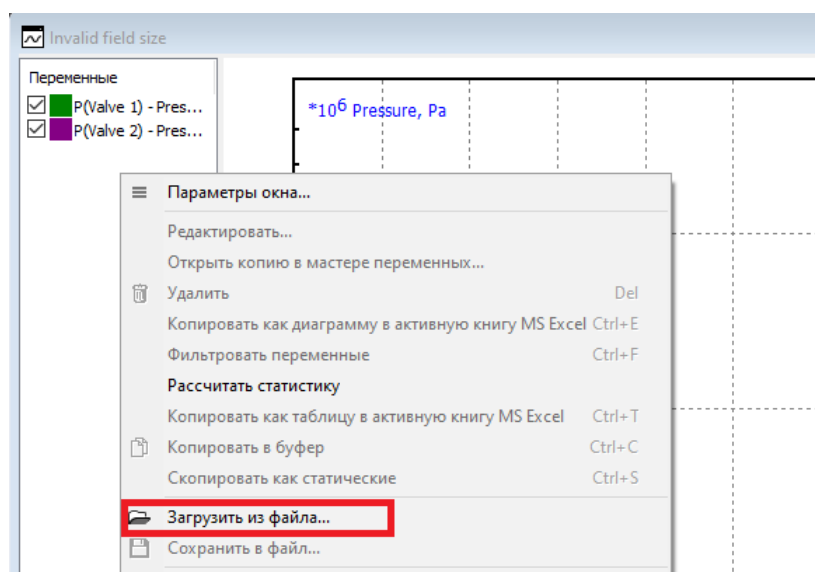


Рис. 31.77. Загрузка графиков из файлов

31.4.1.2. Test 2: Зарядка и разрядка

Следующий тест позаимствован из статьи [16], где авторы рассматривают как зарядку, так и разрядку бака для нескольких давлений. Модель

[{Данные УМ } \SAMPLES \ Pneumatics \ Charge and discharge.](#)

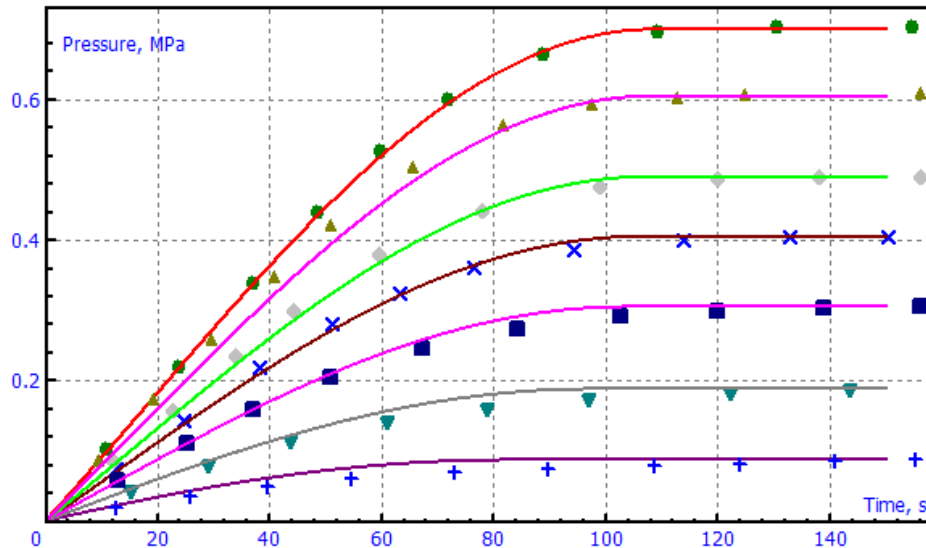


Рис. 31.78. Сравнение моделирования процесса зарядки бака с измерениями (маркеры) для различных значений давления

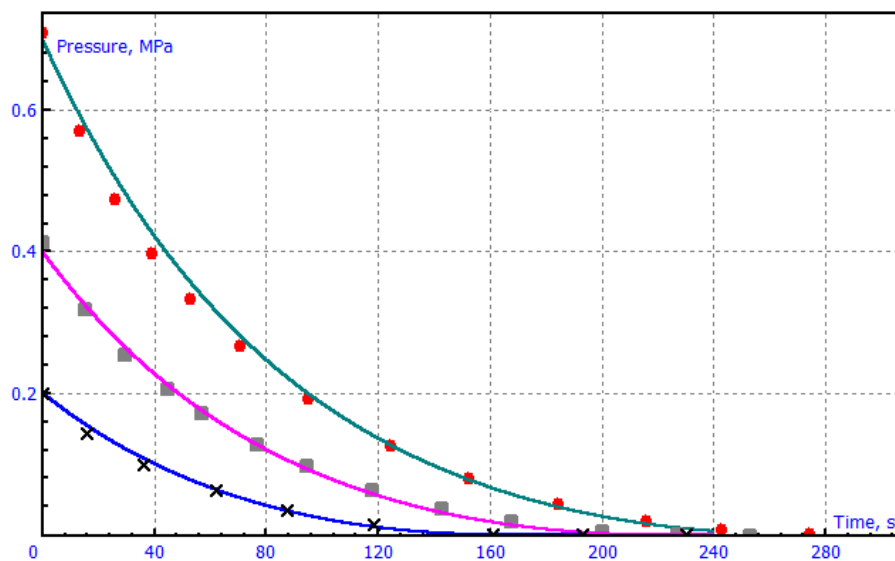


Рис. 31.79. Сравнение моделирования процесса разрядки бака с измерениями (маркеры) для различных значений давления

Моделирование в УМ сравнивается с измерениями на рис. 31.78 и рис. 31.79.

Как повторить тест?

1. Откройте модель [{Данные УМ } \SAMPLES \ Pneumatics \ Charge and discharge](#) в программе UM Simulation.

2. Следуя рис. 31.77, загрузите экспериментальные данные в графические окна из текстовых файлов:

- окно с переменной **P (Discharge)**:

Discharge 2bar.txt

Discharge 4bar.txt

Discharge 7bar.txt

- В окне с переменной **P (Charge)**:

Charge 1bar.txt

Charge 1.9bar.txt

Charge 3bar.txt

Charge 4bar.txt

Charge 5bar.txt

Charge 6bar.txt

Charge 7bar.txt

3. Установите желаемое значение исходного давления в баке для разрядки (малый бак, пневматическая система **Discharge**), и значение, до которого надо зарядить бак (для большой камеры, пневмосистема **Charge**), рис. 31.80.

4. Запустите моделирование.

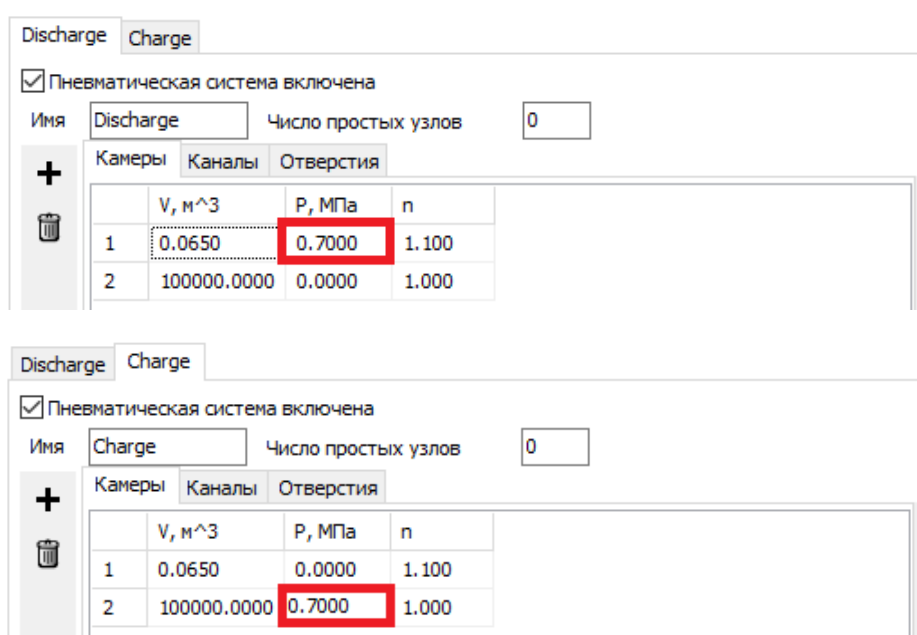


Рис. 31.80. Пневматические системы для моделирования процессов зарядки и разрядки бака

31.4.2. Динамическая жесткость и демпфирование

31.4.2.1. Тест 1: Пневморессора, соединенная трубкой со вспомогательным резервуаром



Рис. 31.81. Схема эксперимента для изучения влияния трубки на динамическую жесткость и демпфирование пневморессоры со вспомогательной камерой

Данное исследование соответствует эксперименту, описанному в статье [17]. Пневмоцилиндр с внутренним диаметром 100мм используется вместо пневморессоры. Цилиндр соединен трубкой со вспомогательным резервуаром. Поршень цилиндра совершает гармонические колебания, и сила, необходимая для этого, измеряется с целью оценки влияния воздуха в трубке на динамическую жесткость и демпфирование пневморессоры, рис. 31.81.

Модель UM

[{Данные UM}\SAMPLES\Pneumatics\Dynamic pipeline.](#)

Параметры модели:

Объем цилиндра в положении равновесия: 1.1 литра;

Объем вспомогательного цилиндра: 2.2 литра;

Длина и диаметр трубки: $L=1.5\text{м}$, $D=7.5\text{мм}$;

Статическое абсолютное давление: 552 кПа.

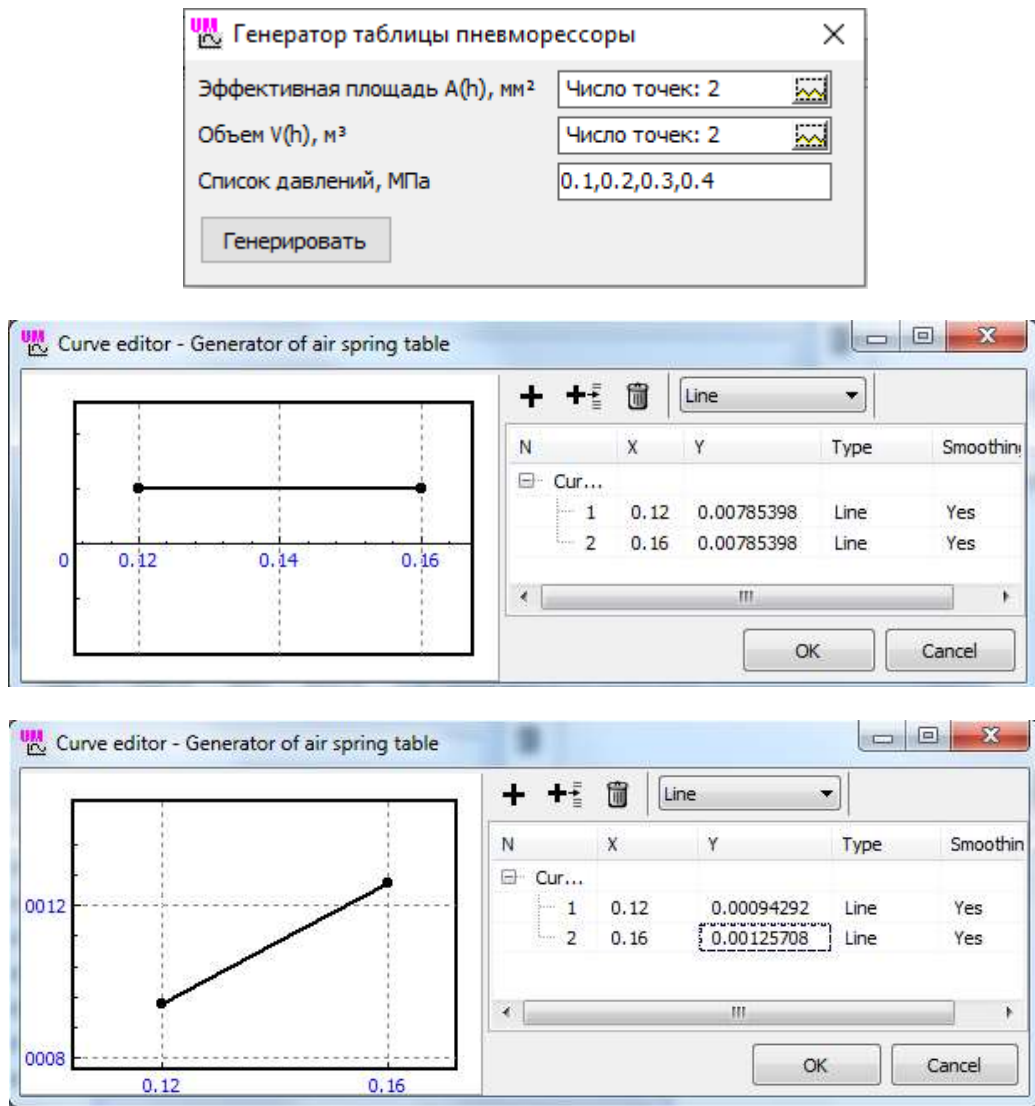


Рис. 31.82. Генерирование табличной модели пневмоцилиндра в качестве пневморессоры

Модель пневмоцилиндра создается с помощью Генератора таблицы пневморессоры, п. 31.2.3.1.3.5 *Создание табличных данных по эффективной площади*. Эффективная площадь в данном случае постоянная

$$A_e = \pi D^2 / 4 = 0.00785398 \text{ м}^2$$

а объем является линейной функцией высоты

$$V_{as} = A_e h$$

Описание соответствующей модели пневморессоры представлено на рис. 31.82. Табличная модель сгенерирована и сохранена в файле "Pneumatic cylinder D100.ast".

Рассмотрим полезные выражения для коэффициента жесткости ПР для возмущений с очень малой и высокой частотой. Используем выражение для жесткости пневморессоры

$$K = \left| \frac{dF}{dh} \right| = \left| \frac{dp}{dh} \right| A_e.$$

Предполагая политропный процесс, производную dp/dh вычислим из выражения

$$\frac{dpV^n}{dh} = \frac{dp}{dh} V^n + npV^{n-1} \frac{dV}{dh} = \frac{dp}{dh} V^n + npV^{n-1} A_e = 0,$$

$$\left| \frac{dp}{dh} \right| = \frac{npA_e}{V},$$

что дает

$$K = \frac{npAe^2}{v}.$$

Используя этот результат, мы можем вычислить коэффициент жесткости для низкочастотной области, когда в формулу подставляется суммарный объем ПР и вспомогательной камеры

$$K_L = 14.2 \text{ N/mm},$$

а также коэффициент жесткости в высокочастотной области, когда учитывается только объем ПР

$$K_H = 42.7 \text{ N/mm}$$

В расчетах полагалось значение индекса политропы $n=1.38$.

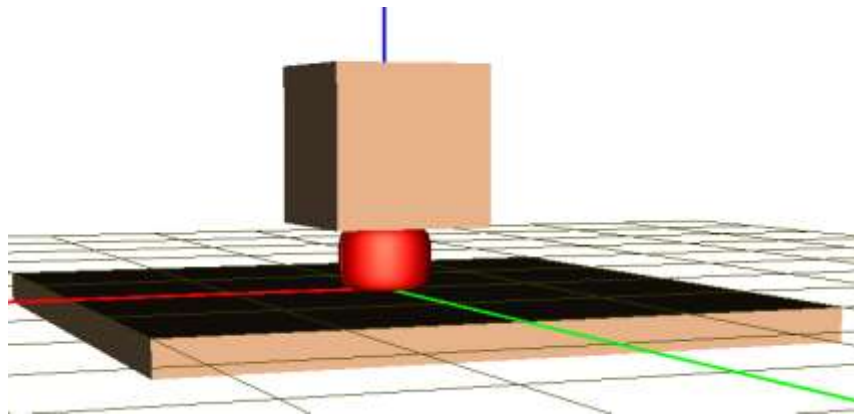


Рис. 31.83. Механическая часть модели "Dynamic pipeline"

Теперь рассмотрим модель UM. Механическая часть модели "Dynamic pipeline" содержит два тела, соединенных силовым элементом- пневморессорой:

- Base - нижнее тело, которое может совершать гармонические колебания с постоянной или скользящей частотой;
- Body - верхнее тело, которое неподвижно.

Таким образом, колебания тела Base приводят к соответствующему изменению высоты ПР.

Шарнир jBase реализует колебания тела Base со скользящей частотой

$$f = f_0 + \epsilon t \text{ Гц},$$

см. рис. 31.84. Следующие идентификаторы параметризуют выражение:

- f_0 - стартовая частота;
- ϵ - темп приращения частоты;
- $ampl$ - амплитуда колебаний.

Если $\epsilon=0$, имеют место гармонические колебания с частотой f_0 .

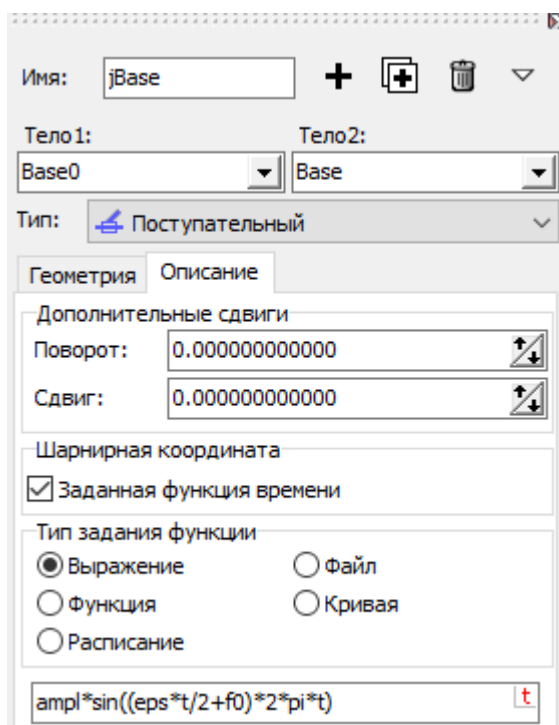


Рис. 31.84. Колебания со скользящей частотой

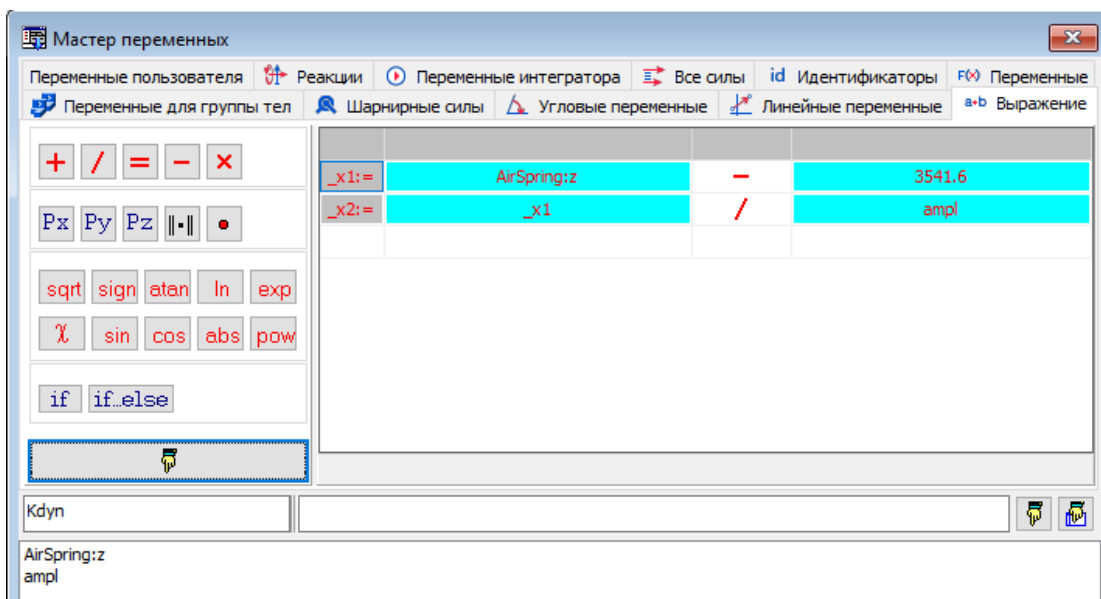


Рис. 31.85. Переменная для расчета динамической жесткости ПР

С помощью этой модели мы сравним моделирование динамической жесткости ПР с измеренными в эксперименте значениями. С этой целью создана переменная *Kdyn*, которая равна отношению амплитуды изменения силы в ПР к амплитуде колебаний, рис. 31.85. Огибающая кривая графика этой переменной в зависимости от частоты возмущения соответствует динамической жесткости ПР.

Параметры модели пневмотрубки приведены на рис. 31.86. Следует обратить внимание на тип модели трубки **Динамическая**, а также на значение относительной шероховатости трубки $\epsilon/d = 0.01$. Интересно, что ни индекс политропы, ни число сегментов не оказывают значительного влияния на результаты, приведенный ниже.

Камеры		Каналы		Отверстия			
Модель канала							
<input type="radio"/> Atlas		<input type="radio"/> Дарси-Вайсбах					
<input type="radio"/> Механика жидкости		<input checked="" type="radio"/> Динамическая					
	Первый узел	Второй узел	L, м	d, мм	e/d	n	N сегм.
1	AirSpring	Rigid chamber 1	1.5	7.5	0.01	1.38	1

Рис. 31.86. Параметры трубки

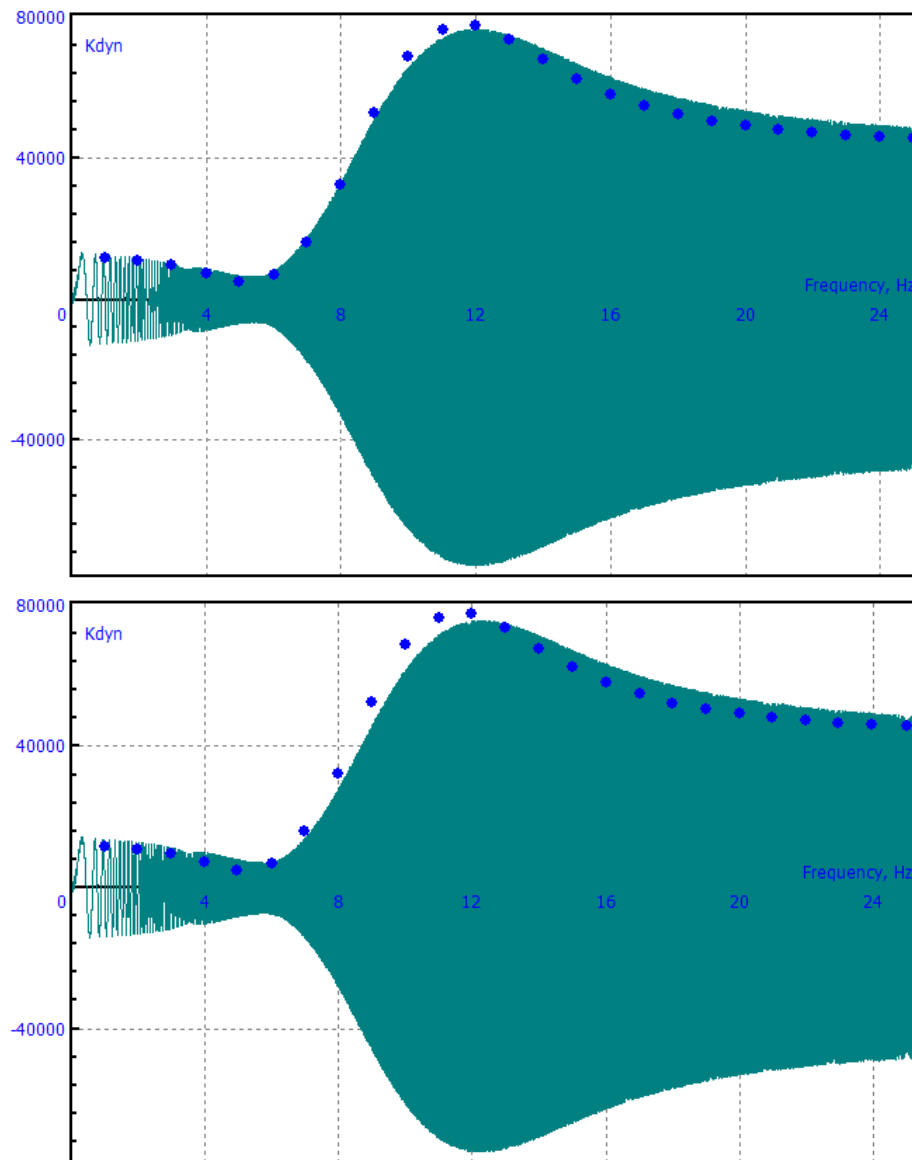


Рис. 31.87. Зависимость динамической жесткости от частоты: сравнение моделирования с экспериментом; амплитуда 1мм, индекс политропы для вспомогательной камеры n=1.2 в случае нижнего графика и n=1.38 для верхнего графика

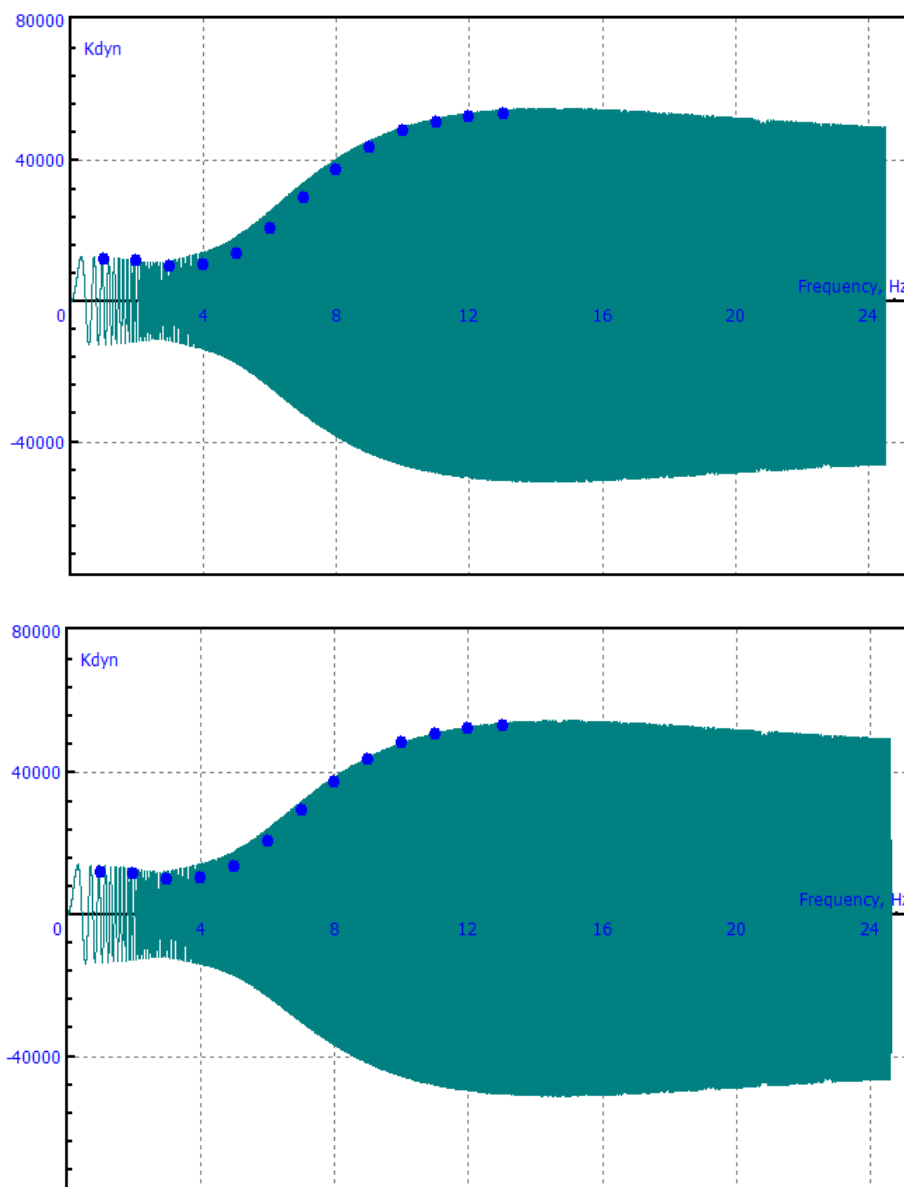


Рис. 31.88. Зависимость динамической жесткости от частоты: сравнение моделирования с экспериментом; амплитуда 5мм, индекс политропы для вспомогательной камеры $n=1.2$ в случае нижнего графика и $n=1.38$ для верхнего графика

Сравнение результатов моделирования в UM с экспериментальными данными из статьи [17] приведены на рис. 31.87 и рис. 31.88. Для лучшего совпадения результатов с экспериментом мы рекомендуем стандартное значение индекса политропы $n=1.38$ для пневморессоры и меньшее значения 1.2 для вспомогательного резервуара. В любом случае, совпадение очень хорошее.

Экспериментальные результаты, приведенные маркером на графиках, сохранены в файлах в каталоге модели

1mm (experiment).txt,

5mm (experiment).txt

и могут быть использованы для повторения теста с моделью UM. Амплитуду колебаний можно изменить в списке идентификаторов, рис. 31.89.

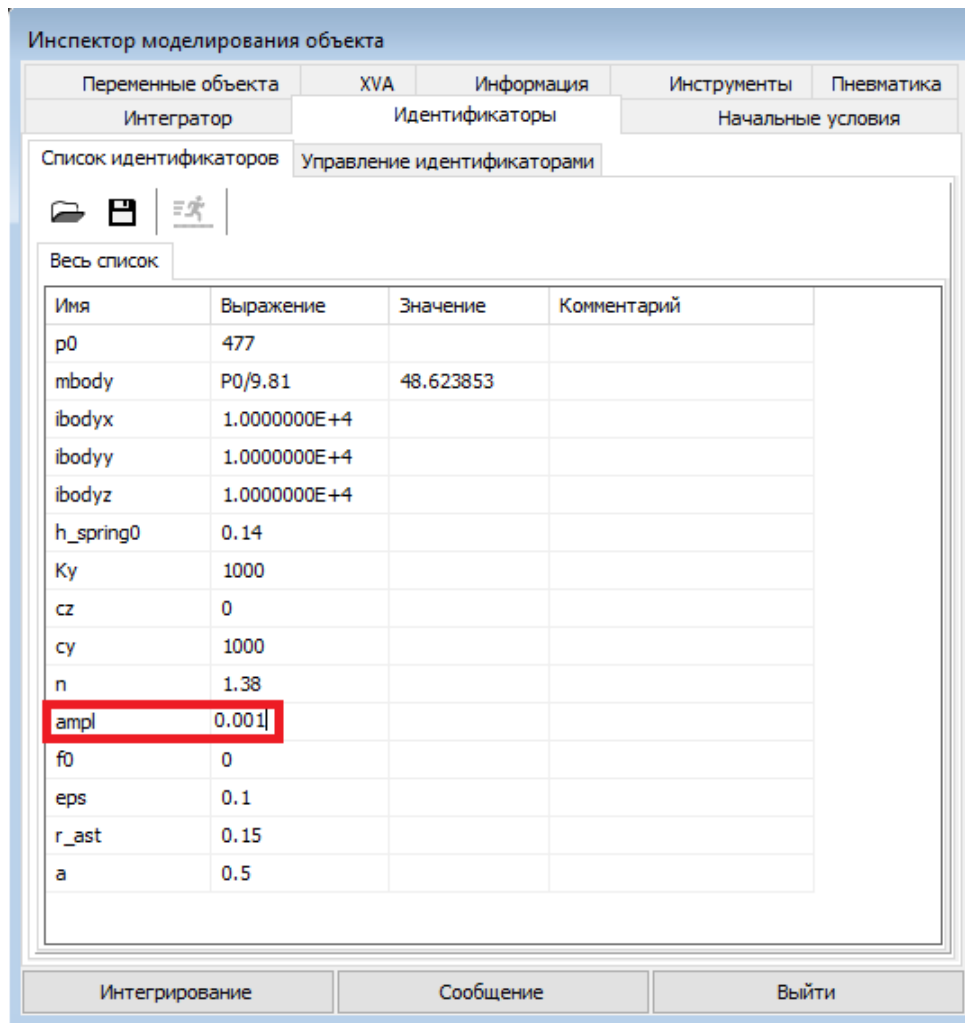


Рис. 31.89. Изменение амплитуды колебаний

В заключение сравним стационарную и динамическую модели пневмотрубки. Результаты сравнения на рис. 31.90 подтверждают, что стационарная модель длинных трубок может быть использована только для медленных процессов.

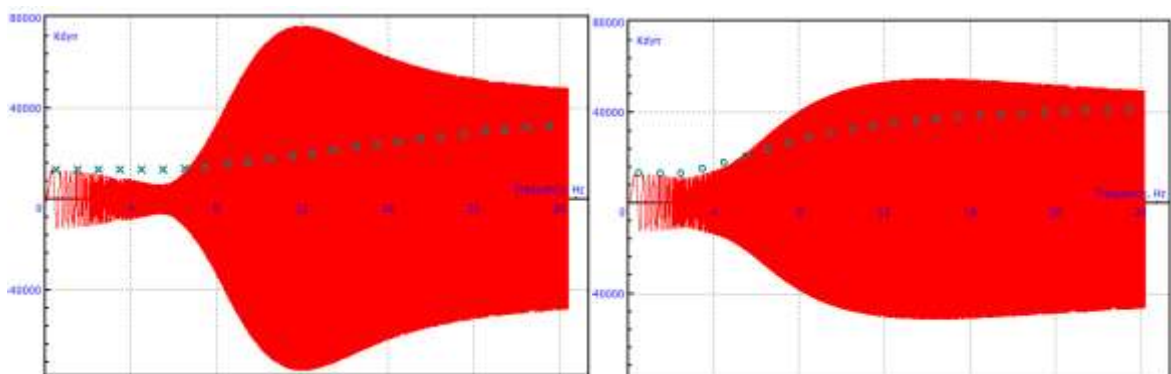


Рис. 31.90. Сравнение стационарной (маркер) и динамической модели трубки

31.4.2.2. Тест 2: Пневморессора, соединенная отверстием со вспомогательным резервуаром

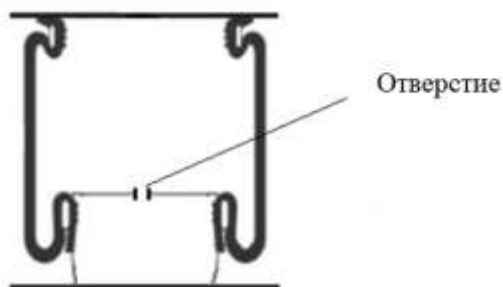


Рис. 31.91. Пневморессора и вспомогательный резервуар

Тест соответствует экспериментальным данным, представленным в статье [18]. В этом тесте пневморессора соединена отверстием со вспомогательным резервуаром, рис. 31.91. В статье предоставлены данные о зависимостях эффективной площади и объема ПР от высоты, которые позволили нам разработать модель ПР, п. 31.2.3.1.3.5 *Создание табличных данных по эффективной площади*. Эксперимент состоит в гармоническом возбуждении нижней опоры ПР и измерении колебаний груза. Модель UM

[{Данные УМ}\SAMPLES\Pneumatics\Orifice test](#)

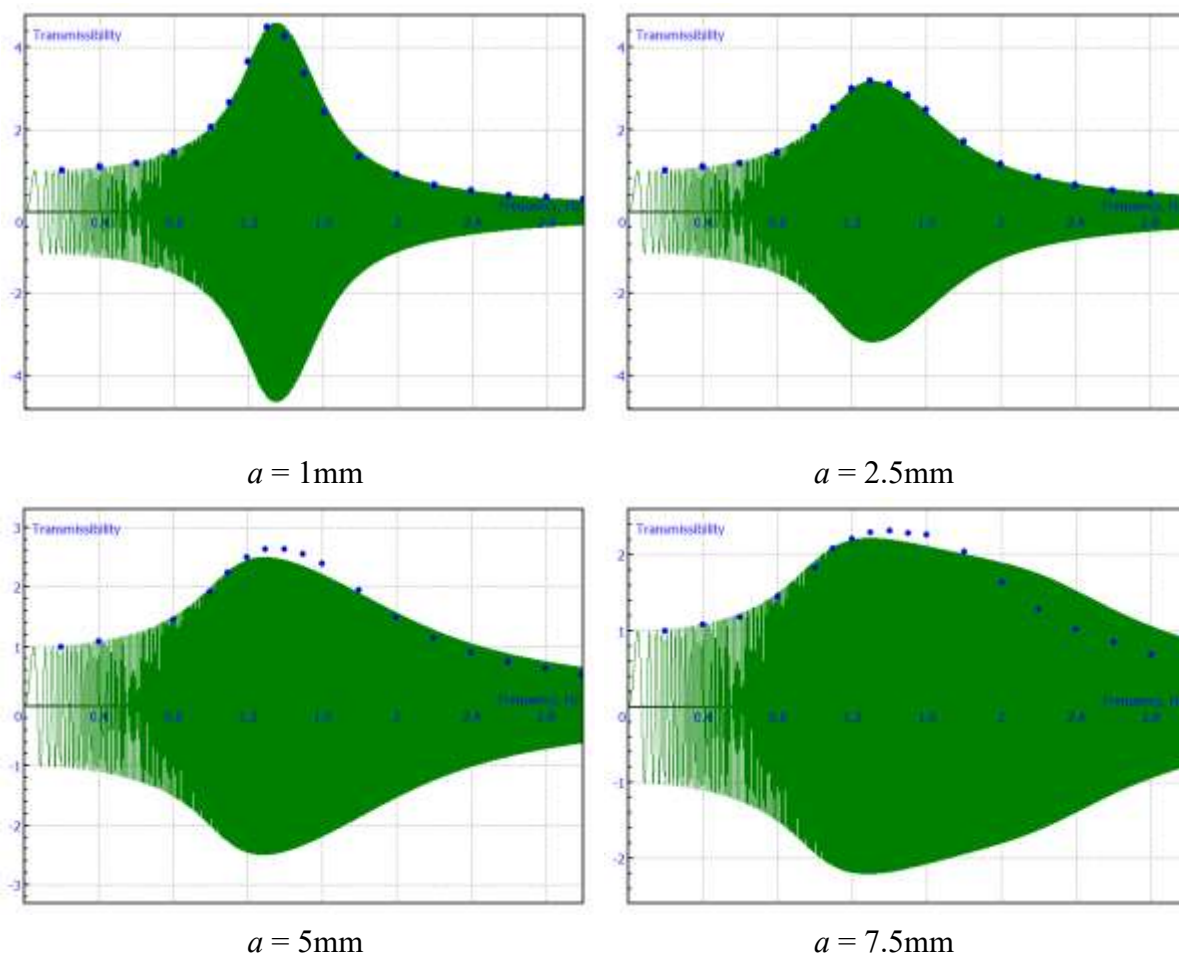


Рис. 31.92. Сравнение результатов моделирования и эксперимента

Мы сравнили результаты моделирования при статическом абсолютном давлении 280 кПа с экспериментом, представленным в [18] для различных амплитуд возбуждения, рис. 31.92. Графики показывают зависимости коэффициентов динамичности (transmissibility) от частоты при различных амплитудах возмущения a . Коэффициент динамичности - это отношение амплитуды колебаний груза к амплитуде возмущения a . Использовалась модель отверстия "Сопло".

Экспериментальные результаты из статьи [18], показанные маркером на рисунках, записаны в текстовые файлы в каталоге задачи

Transmissibility 1mm.txt,

Transmissibility 2.5mm.txt,

Transmissibility 5mm.txt,

Transmissibility 7.5mm.txt,

и могут быть использованы для повторения теста с моделью UM. Амплитуда возмущения может быть изменена в списке идентификаторов подобно рис. 31.89.

31.4.3. Модели с пневморессорами

31.4.3.1. Испытательный стенд с тремя пневморессорами

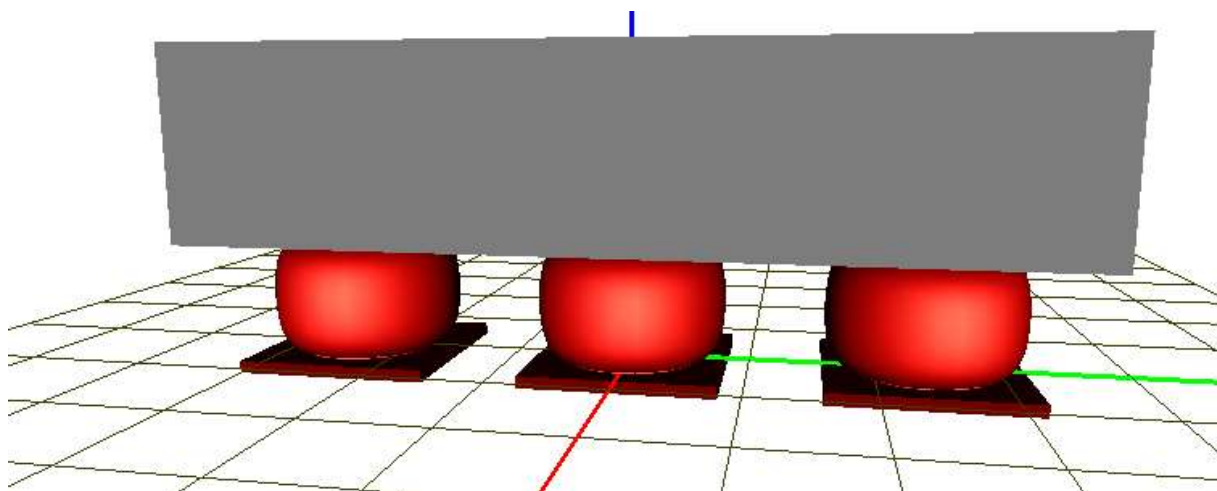


Рис. 31.93. Testing stand with three AS

Модель стенда расположена в

[{Данные УМ}\SAMPLES\Pneumatics\test_3as](#)

Модель включает три пневморессоры, поддерживающие абсолютно твердое тело, которое имеет три степени свободы в вертикальной плоскости, рис. 31.93. Положение трех платформ под каждой ПР параметризовано идентификаторами z_as1 , z_as2 , z_as3 , рис. 31.94.

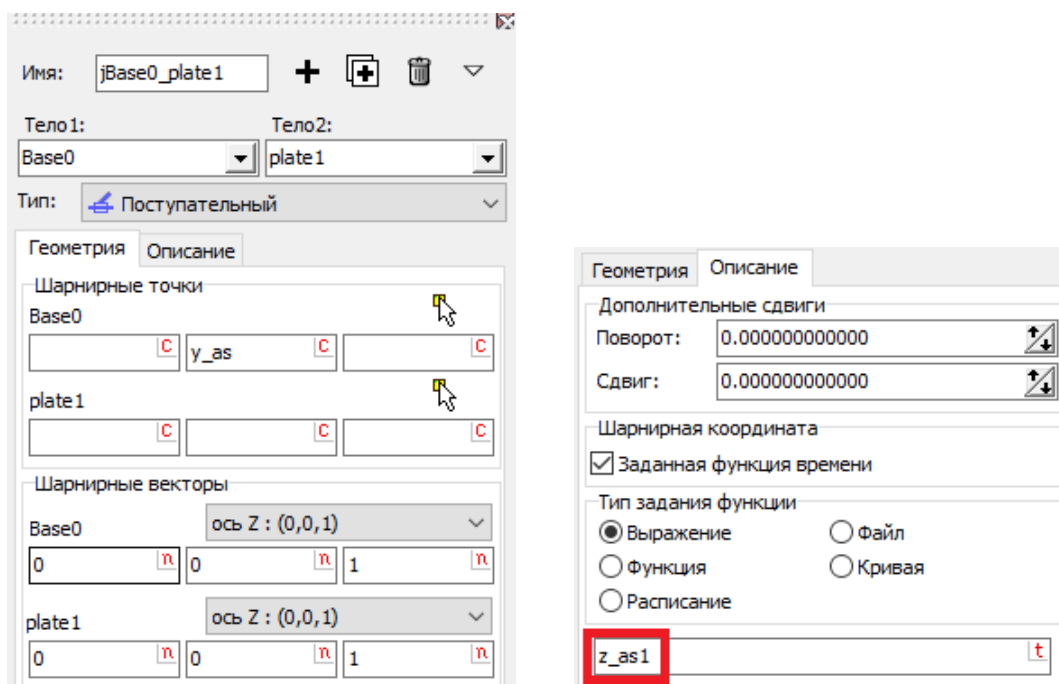


Рис. 31.94. Шарнир для тела Plate1

Модель разработана для тестирования подвески с пневморессорами, связанными пневмотрубками, рис. 31.94. Трубки соединены тройником, который моделируется в UM PS простым узлом, п. 31.2.4 Соединения (простые узлы) (Node 1 на рис. 31.49).

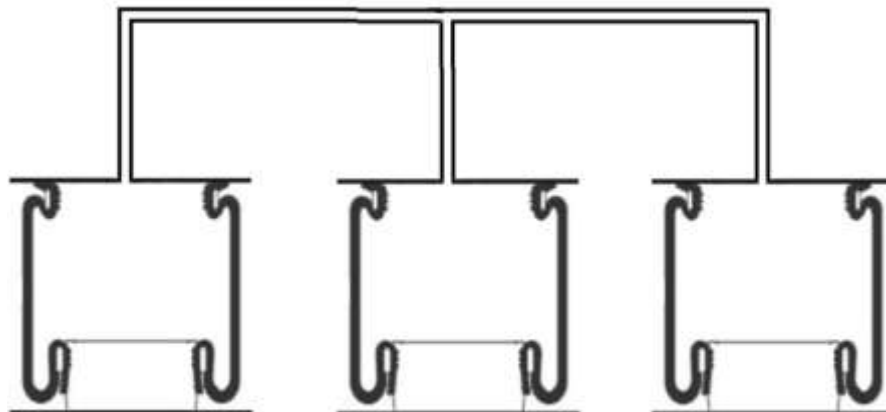


Рис. 31.95. Связанные пневморессоры

Пользователь может задать движение платформы под каждой ПР с помощью инструмента **Управление идентификаторам**, рис. 31.96. В качестве примера мы подготовили два возмущения для платформы Plate1: ступенчатую и гармоническую функции, рис. 31.97, рис. 31.98.

Для задания ступенчатой функции мы использовали редактор кривых, рис. 31.97.

Гармоническая функция создана с использованием мастера переменных и перенесена мышкой в поле **Назначенная переменная** окна **Управление идентификатором**, рис. 31.98. Для значения частоты использован идентификатор *freq*, амплитуды - *ampl*, так что пользователь может изменять их значения в списке идентификаторов модели.

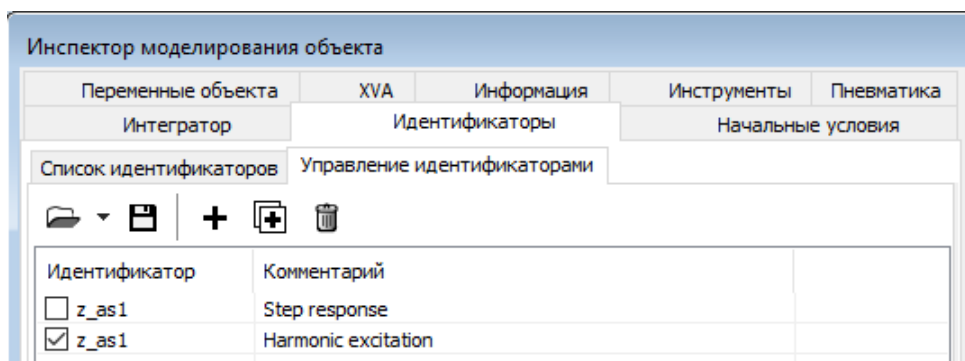


Рис. 31.96. Пример управления идентификаторами для вертикального положения тела Plate1

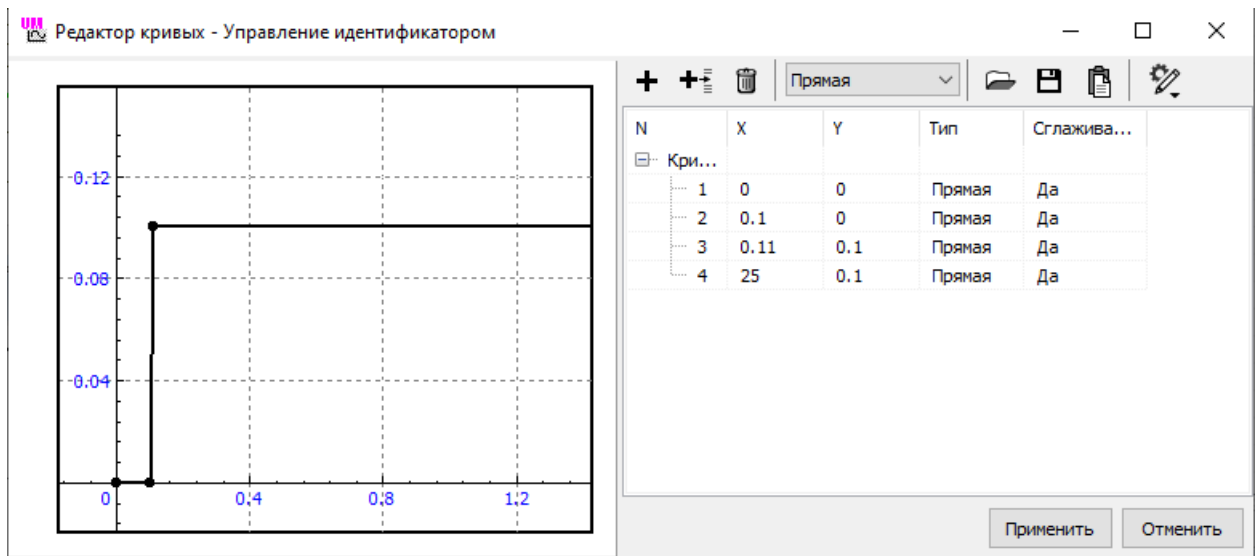
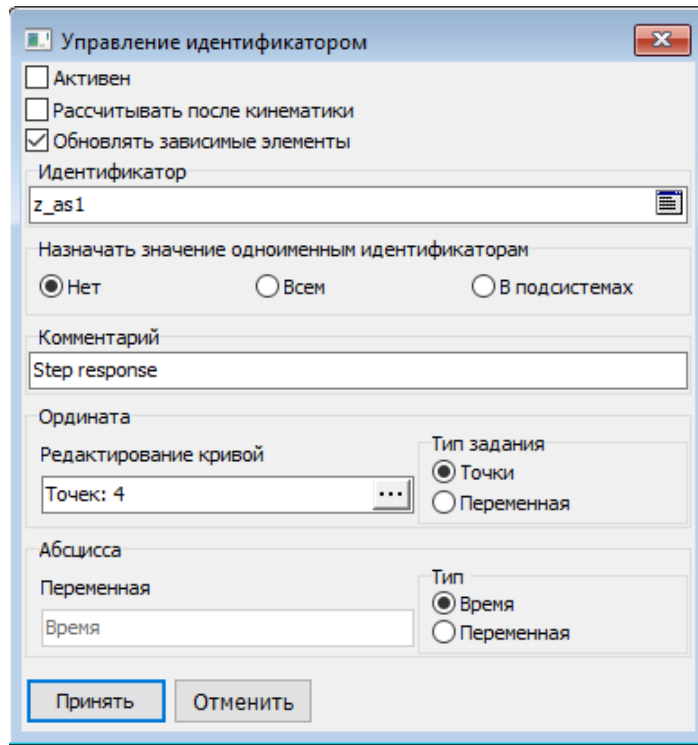


Рис. 31.97. Ступенчатая функция для идентификатора z_as1

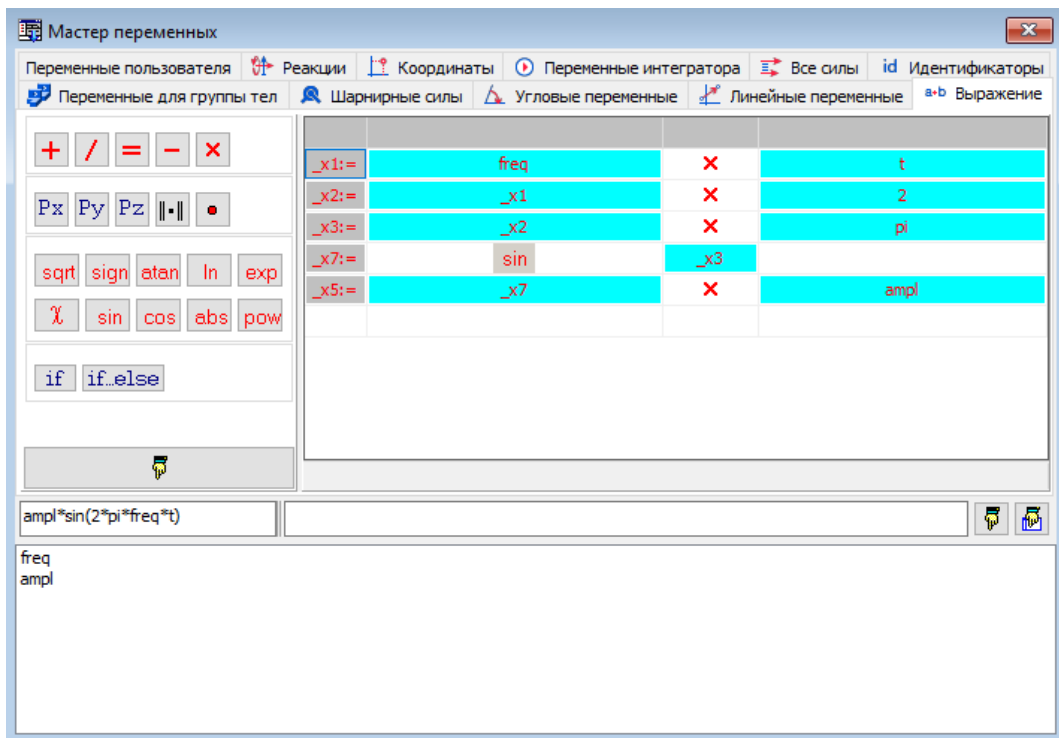
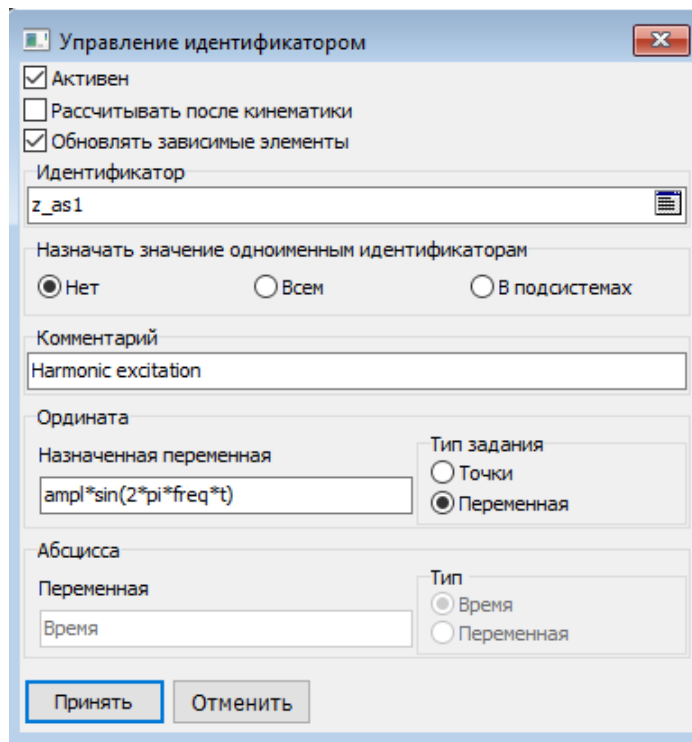


Рис. 31.98. Гармоническая функция для управления идентификатором

31.4.3.2. Испытательный стенд с шестью пневморессорами

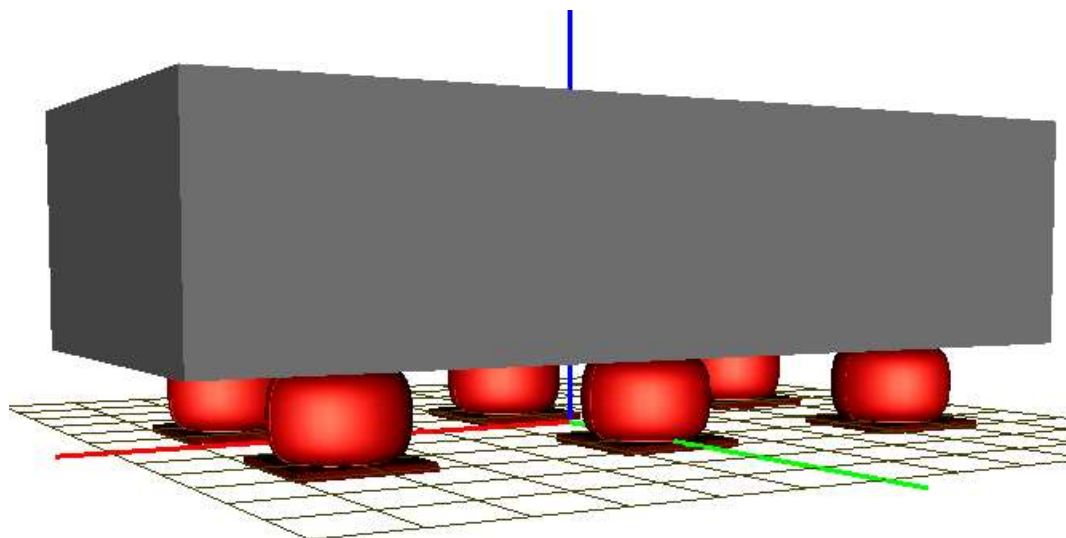


Рис. 31.99. Испытательный стенд с шестью ПР

Модель стенда:

[{Данные УМ}\SAMPLES\Pneumatics\test_6as](#)

Модель включает шесть ПР, поддерживающих абсолютно твердое тело с шестью степенями свободы рис. 31.93. Положение шести платформ под каждой ПР параметризовано идентификаторами z_{as1l} , z_{as2l} , z_{as3l} , z_{as1r} , z_{as2r} , z_{as3r} .

Модель разработана для тестирования подвески с ПР, соединенными пневмотрубками. Мы разработали два типа связей ПР.

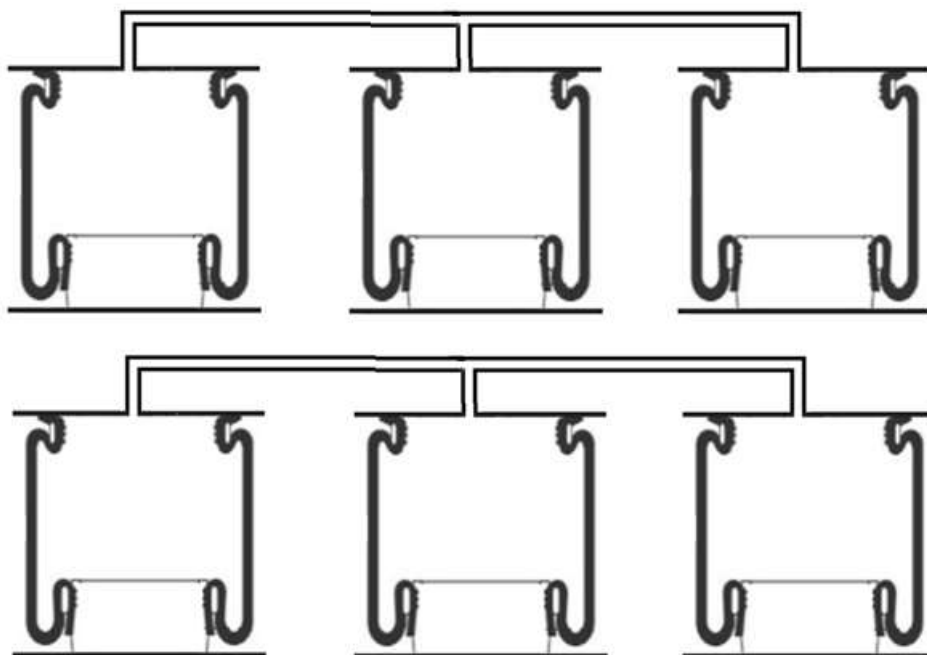


Рис. 31.100. Схема PS 1

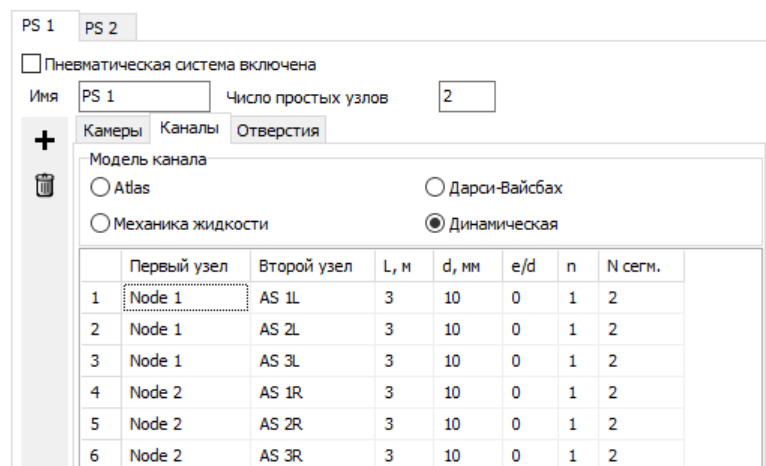


Рис. 31.101. Соединения PS 1

PS1, рис. 31.100: левые и правые ПП соединены независимо двумя тройниками, Node 1, Node 2 на рис. 31.101.

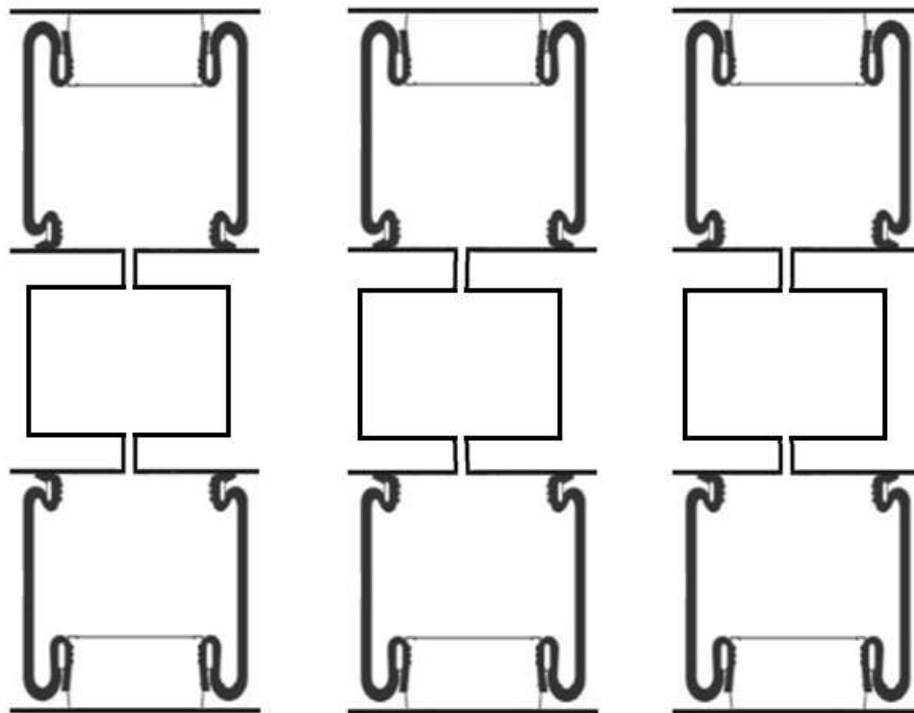


Рис. 31.102. Схема PS 2

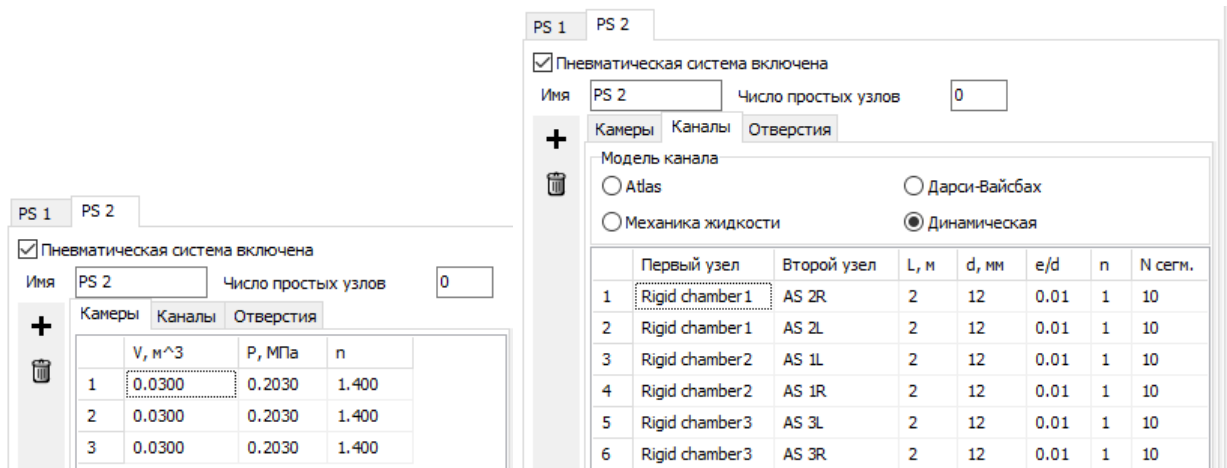


Рис. 31.103. Соединения PS 2

PS2, рис. 31.102: левые и правые ПР соединены попарно с тремя резервуарами с постоянным объемом, рис. 31.103.

Функции возмущения платформ являются переменными времени, рис. 31.98, рис. 31.104. Переменные сохранены в файле *Excitation functions.var* file, который может быть открыт пользователем в окне списка переменных. Для этого используется команда основного меню **Инструменты | Список переменных** и далее кнопка для открытия файла, рис. 31.105.

Переменная, аппроксимирующая ступенчатую функцию, зависит от двух идентификаторов:

- *h_step* - высота ступени;
- *t_step* - постоянная времени, определяющая темп роста функции.

Эти или другие переменные могут быть назначены управлению идентификатором, как это показано на рис. 31.106.

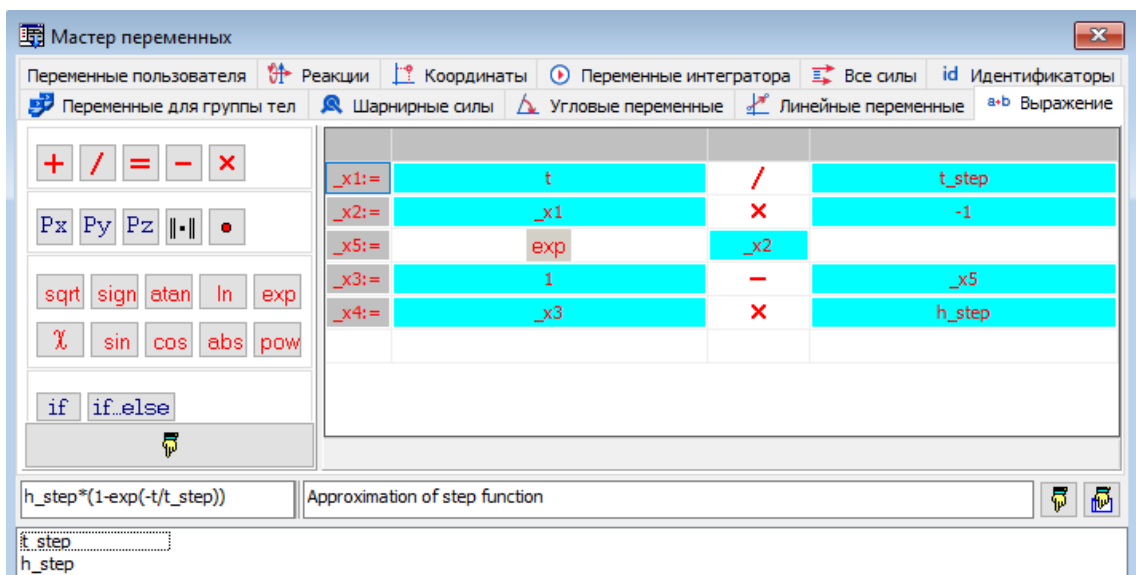


Рис. 31.104. Переменная, аппроксимирующая ступенчатую функцию

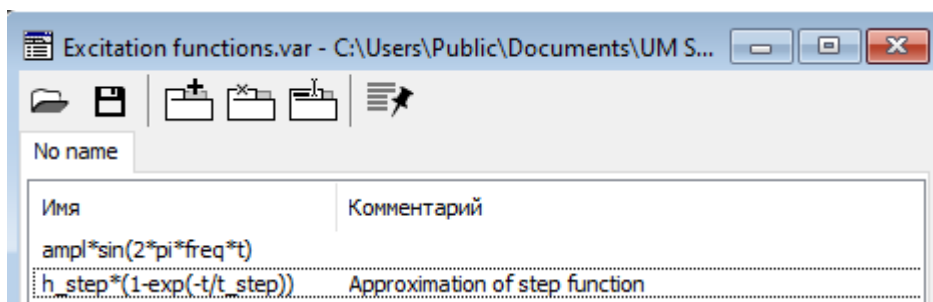


Рис. 31.105. Список переменных для задания возмущений

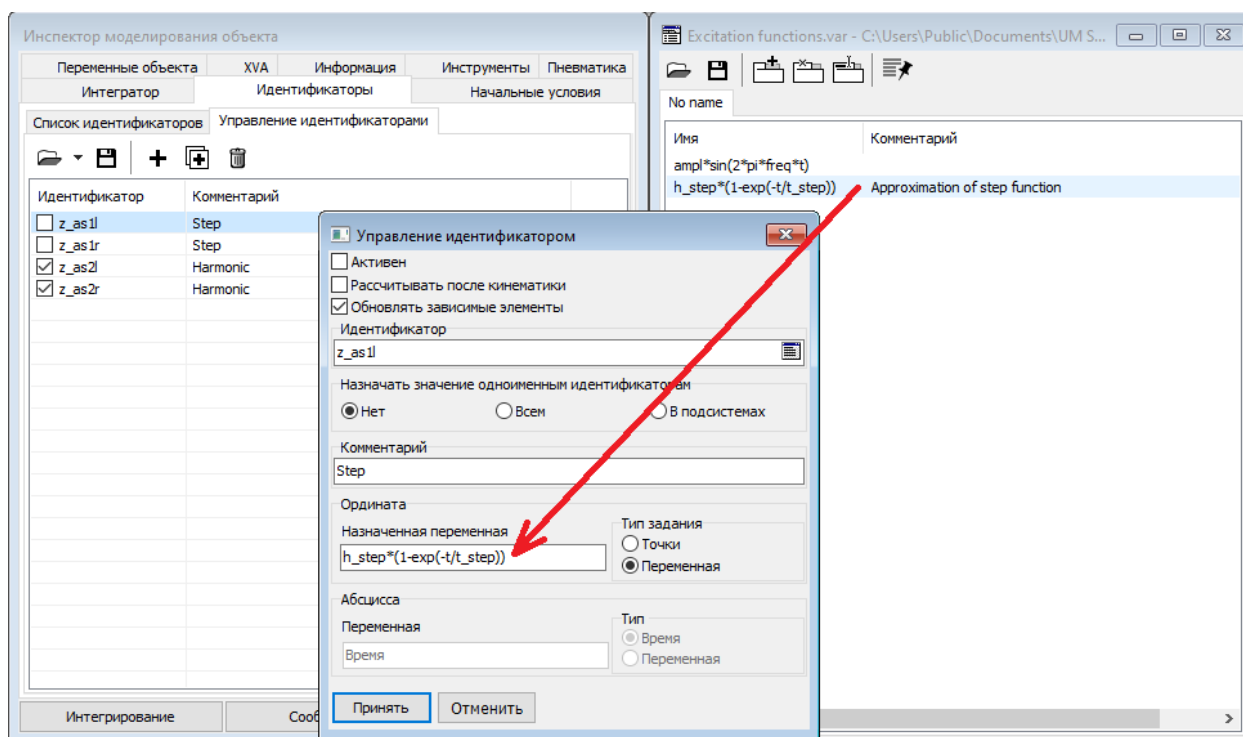


Рис. 31.106. Назначение переменной управлению идентификатором

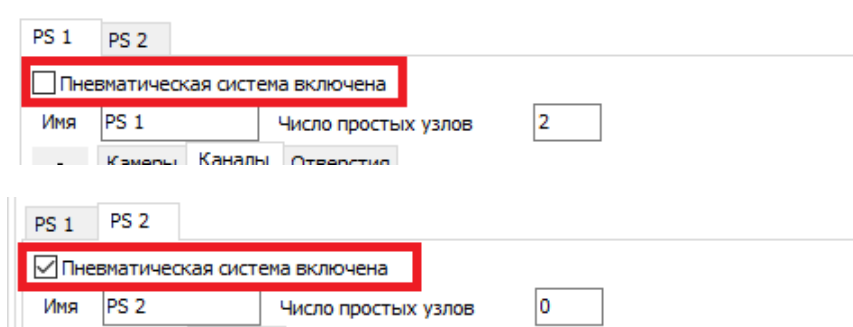


Рис. 31.107. Enabled and disabled PS

Перед началом моделирования пользователь может активировать одну из двух пневматических систем, рис. 31.107. Если ни одна из ПС не активна, пневморессоры рассматриваются как изолированные.

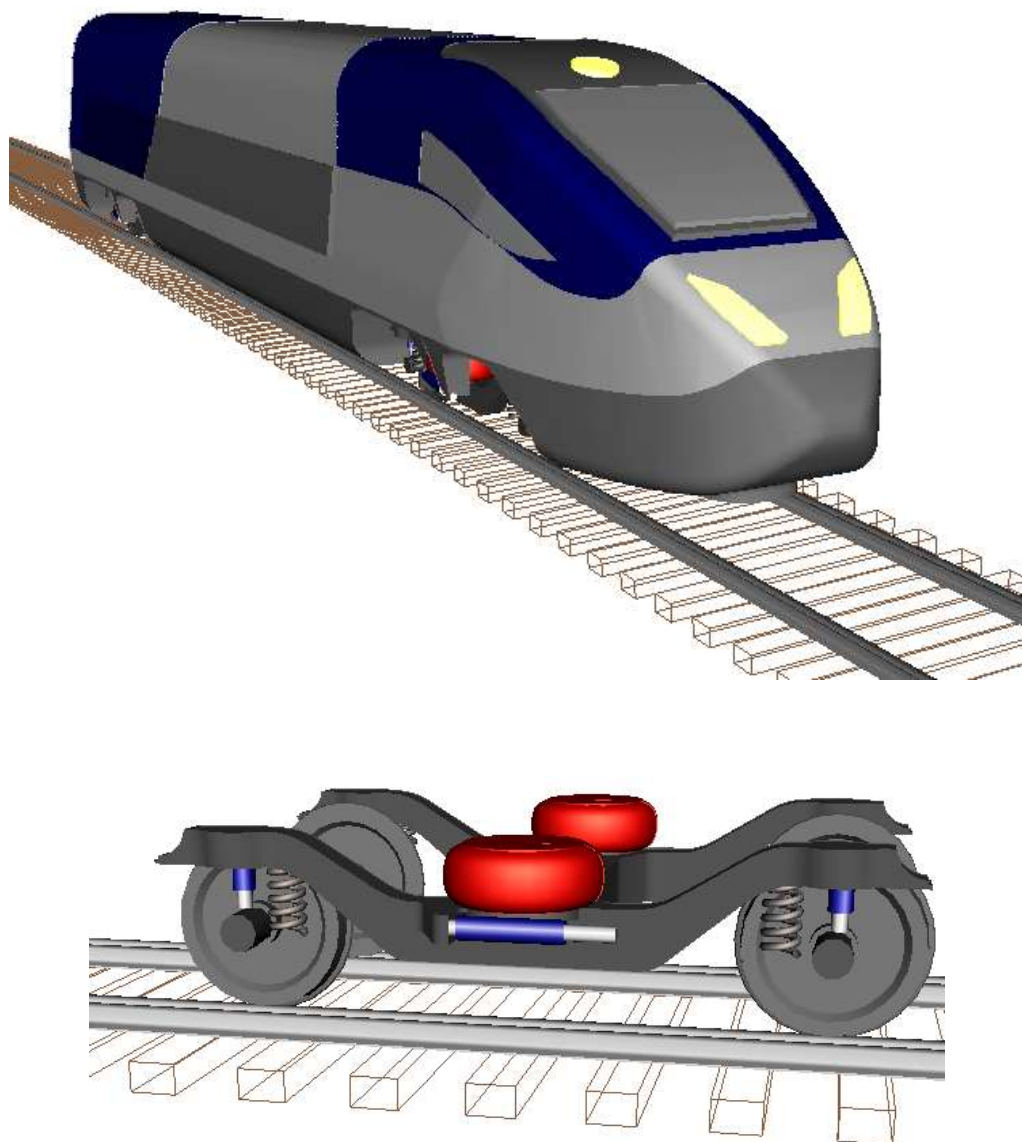
31.4.3.3. Тестовая модель: высокоскоростной моторный вагон

Рис. 31.108. Модель UM моторного вагона электропоезда

Упрощенная модель моторного вагона скоростного поезда находится в каталоге [{Данные УМ}\SAMPLES\Pneumatics\motorcar](#)

Вторая ступень подвески вагона включает две пневморессоры для каждой тележки, рис. 31.108. В данной модели мы использовали данные для ПР YI-FT 1710-38-324, ENIDINE Incorporated [19], рис. 31.109.

С данной моделью пользователь может сравнить результаты моделирования для двух случаев:

Вариант 1: Изолированные ПР

Пневматическая систем выключена, но включены вертикальные гасители во второй ступени.

Вариант 2: Пневморессоры соединены трубками со вспомогательными резервуарами, рис. 31.110.

Пневматическая система включена, а гасители во второй ступени - выключены.

Для загрузки вариантов моделирования откройте модель в UM Simulation и загрузите одну из двух конфигураций с помощью команды основного меню **Файл | Загрузить конфигурацию | Auxiliary chambers/Isolated air spring**.

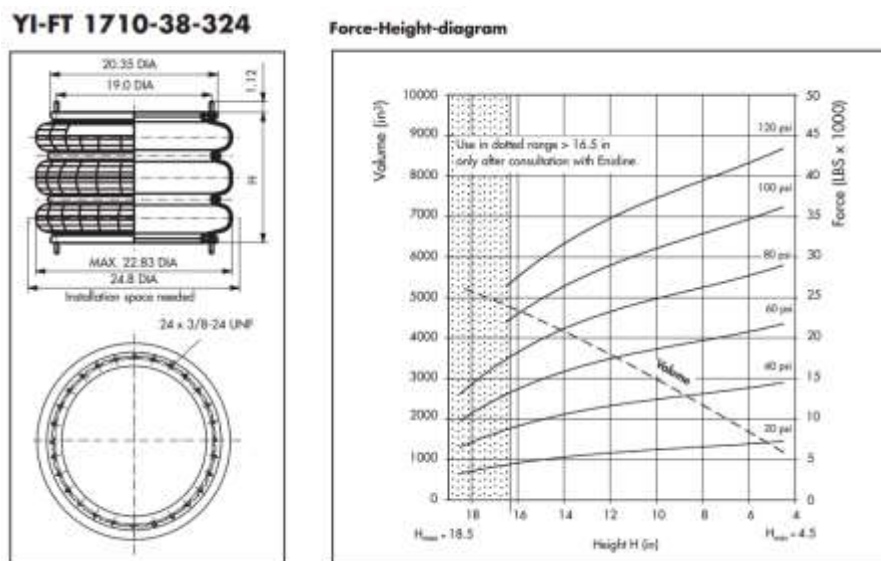


Рис. 31.109. Диаграммы для ПР YI-FT 1710-38-324

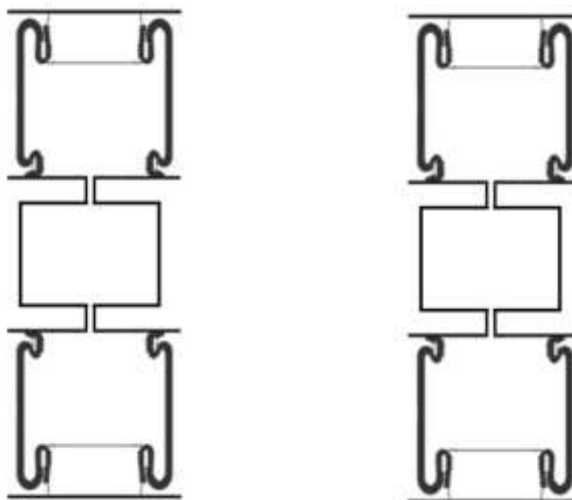


Рис. 31.110. Соединение ПР для тележек

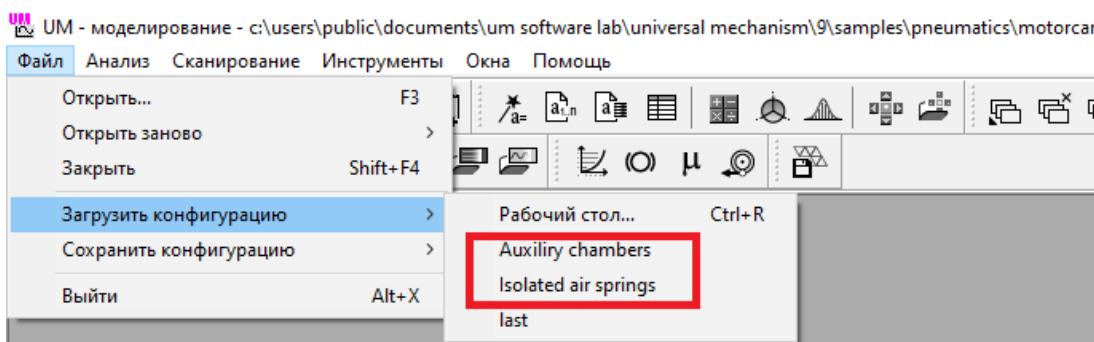


Рис. 31.111. Выбор конфигурации модели

31.4.4. Модель станда с клапаном HCV

Данный пример разработан на базе станда, описанного в п. 31.4.3.1. *Испытательный стенд с тремя пневморессорами* и расположен в каталоге

[{Данные УМ}\SAMPLES\Pneumatics\test_3as HCV](#)

31.4.4.1. Добавление тел, шарниров и силовых элементов в модель станда

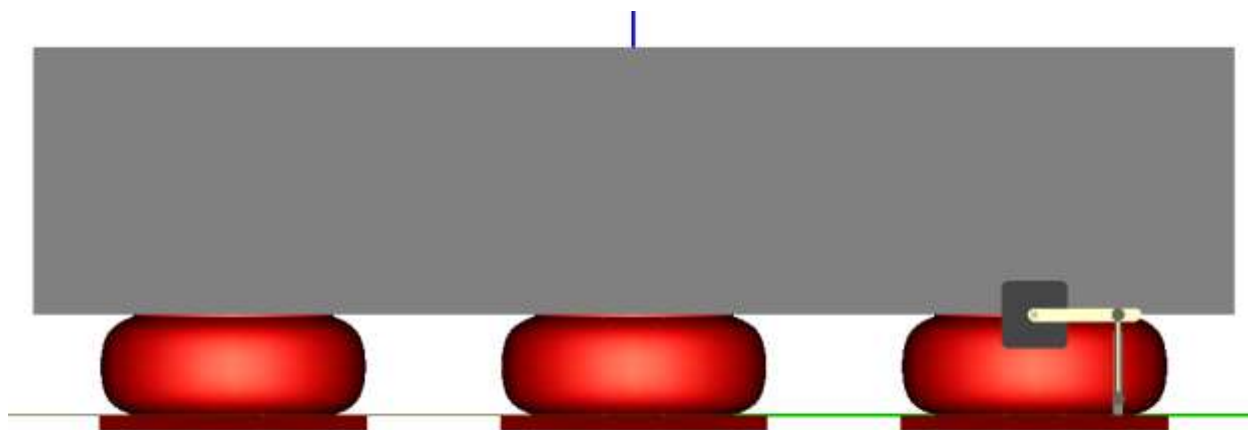


Рис. 31.112. Модель станда с клапаном HCV

Стенд, подробно описанный в п. 31.4.3.1, дополнен упрощенной моделью клапана, включающей корпус, рычаг управления и элементом, связывающим рычаг с первой платформой, рис. 31.112. Цель данной модели механической части клапана – получить и передать в пневмосистему угол поворота рычага управления при перемещении тел.

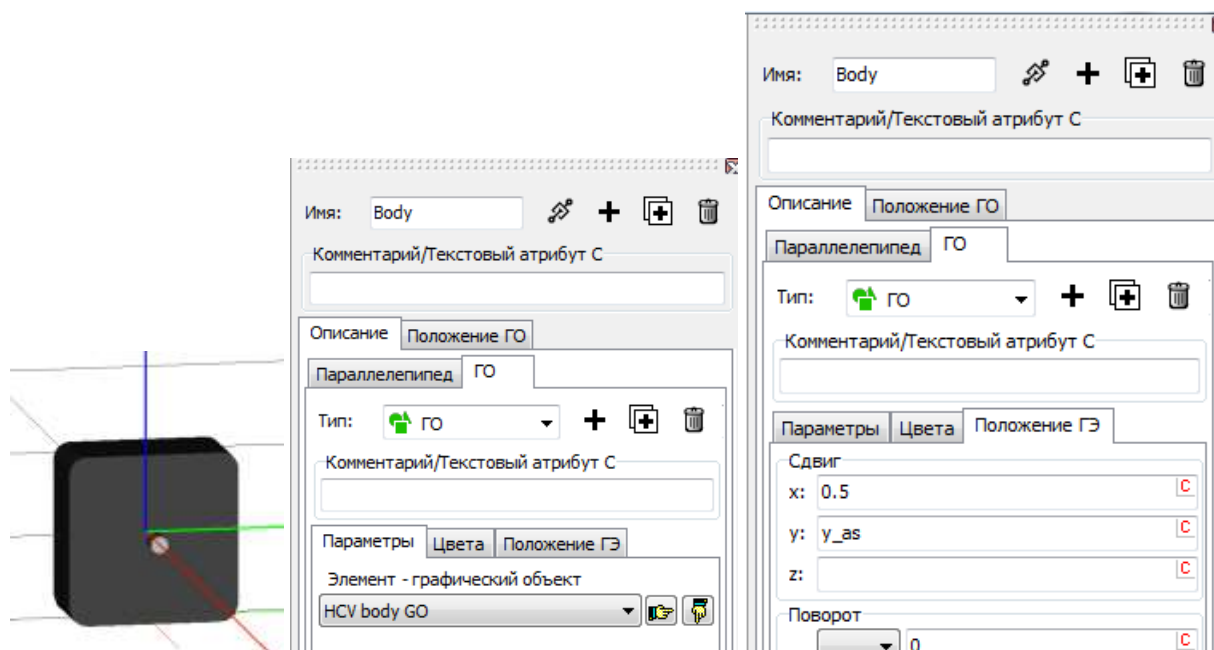


Рис. 31.113. Образ корпуса HCV (слева), ссылка на него в ГО тела Body (в центре) и сдвиг (справа)

Корпус клапана жестко связан с телом *Body*, поддерживаемым тремя пневморессорами. Для корпуса не вводится отдельное тело, а только графический образ *HCV body GO*, который включается в графический образ тела *Body* в виде ссылки на ГО со сдвигом в нужное положение, рис. 31.113.

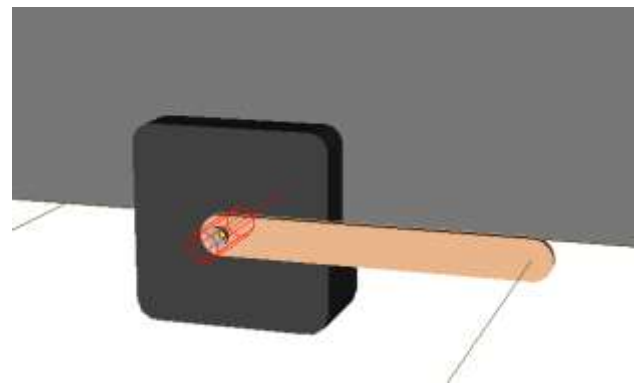
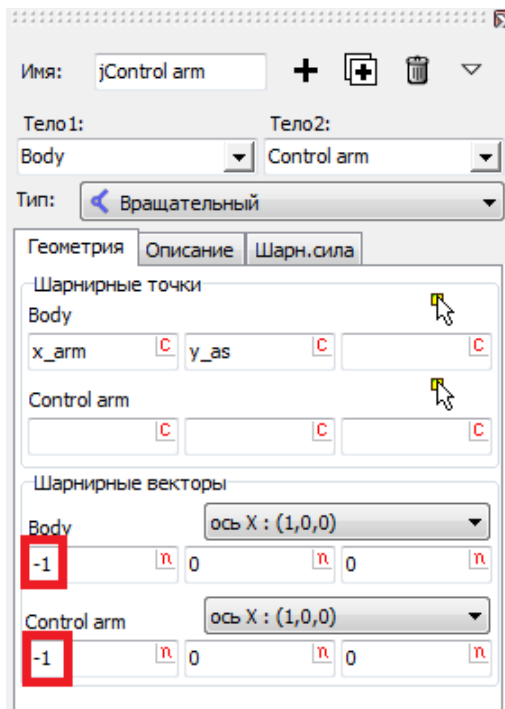


Рис. 31.114. Шарнир, связывающий рычаг управления с корпусом

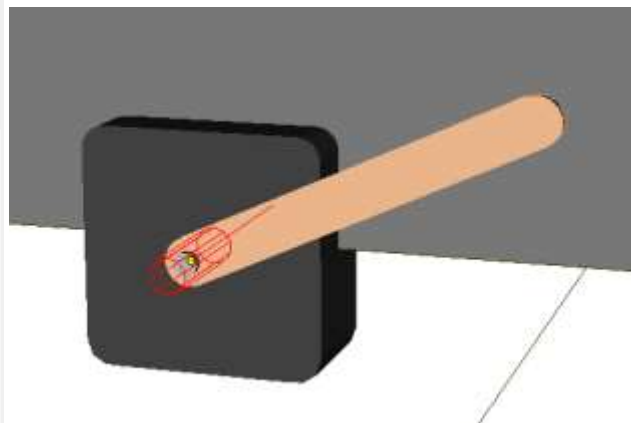
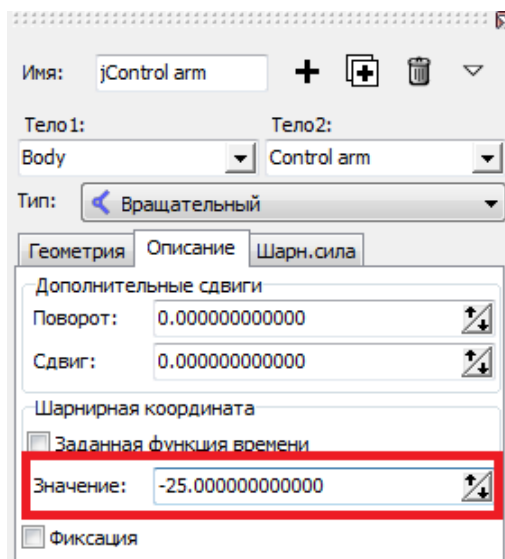


Рис. 31.115. Отрицательное значение координаты соответствует впуску

Рычаг управления моделируется телом *Control arm*, связанным вращательным шарниром с телом *Body*, рис. 31.114. Поскольку шарнирная координата используется для управления клапаном, важно, чтобы координата точно соответствовала абсциссе кривой объемного потока. Во-первых, нулевое значение координаты должно соответствовать нулю абсциссы. Во-вторых, знак координаты должен совпадать со знаком абсциссы, в про-

тивном случае вместо впуска клапан будет давать выхлоп. В примере кривой потока на рис. 31.36 впуск соответствует отрицательным значениям абсциссы, рис. 31.115. Чтобы достичь данного соответствия для координаты, изменены направления шарнирных векторов в описании шарнира на рис. 31.114: по умолчанию шарнирные векторы направлены в положительную сторону оси X, а в корректной модели они направлены в отрицательную сторону. Заметим, что в программе моделирования можно легко сформировать переменную, равную координате с противоположным знаком, поэтому в случае ошибки в описании модели пользователь может исправить ее перед моделированием.

Элемент, связывающий рычаг управления с платформой моделируется линейным биполярным силовым элементом *Control arm linkage*, рис. 31.116. При задании координат важно выполнить следующие условия для нейтрального положения рычага, когда пневморессора имеет нужную высоту, заданную идентификатором $h_spring0$:

- связь вертикальна;
- связь недеформирована, то есть расстояние между точками, соединенными элементом, равно длине недеформированного биполярного элемента (идентификатор $link_length$).

Второе условие достигается в модели тем, что вертикальная координата прикрепления элемента к платформе задана выражением $h_spring0-link_length$.

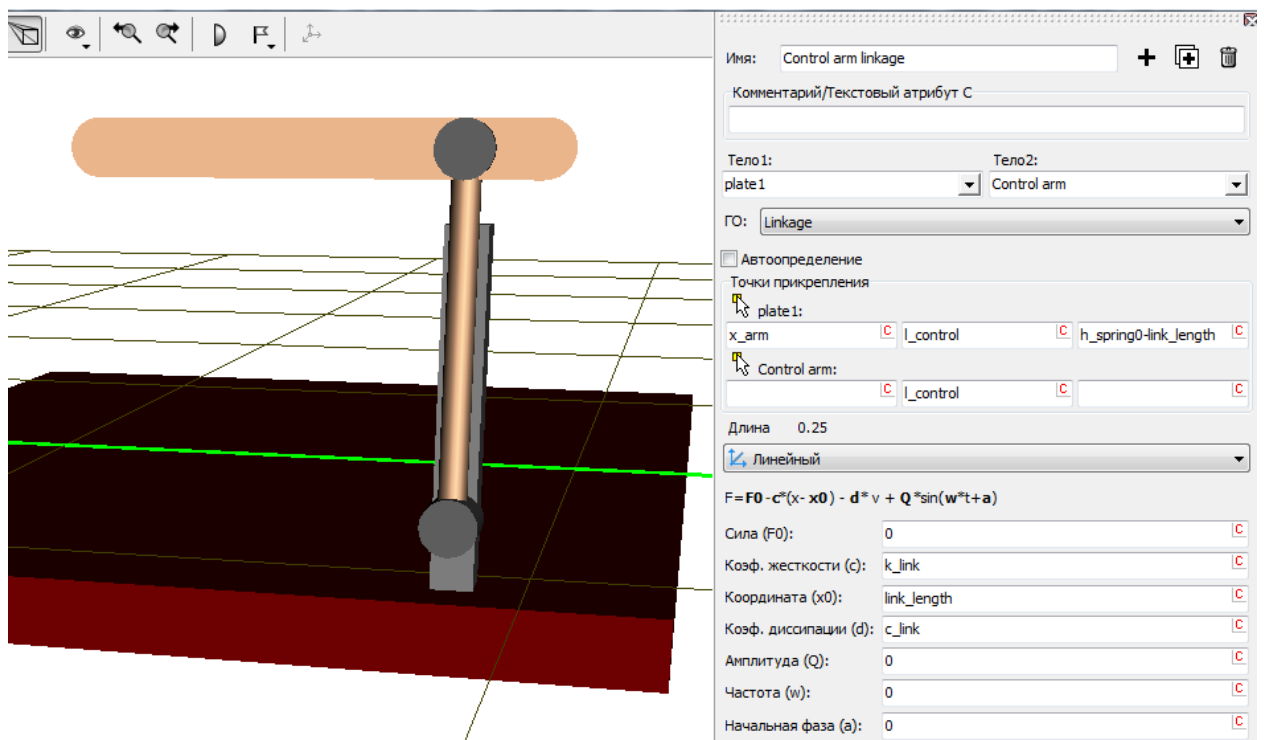



Рис. 31.116. Связь рычага с платформой

Для удобства пользователя элементы модели клапана сохранены в отдельном файле [{Данные УМ}\SAMPLES\Pneumatics\HCV\input.dat](#).

В данном файле предполагается, что клапан расположен в плоскости XZ, соответственно изменено положение графических образов и оси шарнира.

Для добавления элементов клапана в модель автомобиля или рельсового экипажа следует открыть модель в программе ввода данных UM Input и воспользоваться кнопкой  для выбора файла

[{Данные УМ}\SAMPLES\Pneumatics\HCV\input.dat.](#)

В результате все элементы и идентификаторы будут добавлены к модели пользователя, и надо будет указать тела, к которым присоединены элементы, координаты шарнирных точек и силового элемента. При необходимости следует скорректировать направление оси вращательного шарнира для рычага управления.

31.4.4.2. Модель пневмосистемы

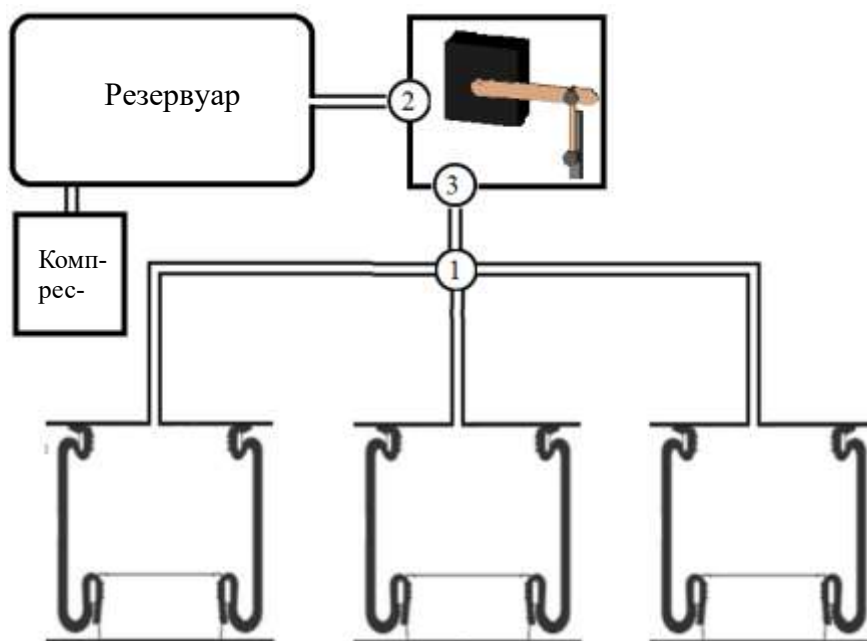


Рис. 31.117. Модель пневмосистемы с клапаном HCV. Номера узлов указаны в кружках

По сравнению с пневмосистемой, описанной в п. 31.4.3.1 *Испытательный стенд с тремя пневморессорами*, в данной модели добавлены следующие элементы, рис. 31.117:

- резервуар (камера с постоянным объёмом);
- компрессор, соединенный с резервуаром;

	Порт 1	Порт 2	Модель HCV	Угл.перем.	Режим	Идентификатор	Макс.угол.	Мин.угол.	Окно (с)
1	Node 2	Node 3	Hendrickson	HCV arm angle	2	hcv_state	15	3	5

Рис. 31.118. Параметры клапана HCV

- клапан HCV, рис. 31.118;
- два узла (номера 2 и 3), соответствующие портам 1 и 2 клапана;
- две пневмотрубки, соединяющие резервуар с портом 1 клапана (узел 2) и узел 1 с портом 2 клапана (узел 3)

31.4.4.3. Создание переменной – угол поворота рычага

Остановимся подробнее на создании переменной, равной углу поворота рычага управления клапана, и ее назначению модели клапана.

- Откройте мастер переменных и на вкладке **Координаты** выберите координату в шарнире *jControl arm* – это угол поворота рычага в радианах, рис. 31.119 . Поскольку на характеристике клапана угол измеряется в градусах, выполним следующий шаг.

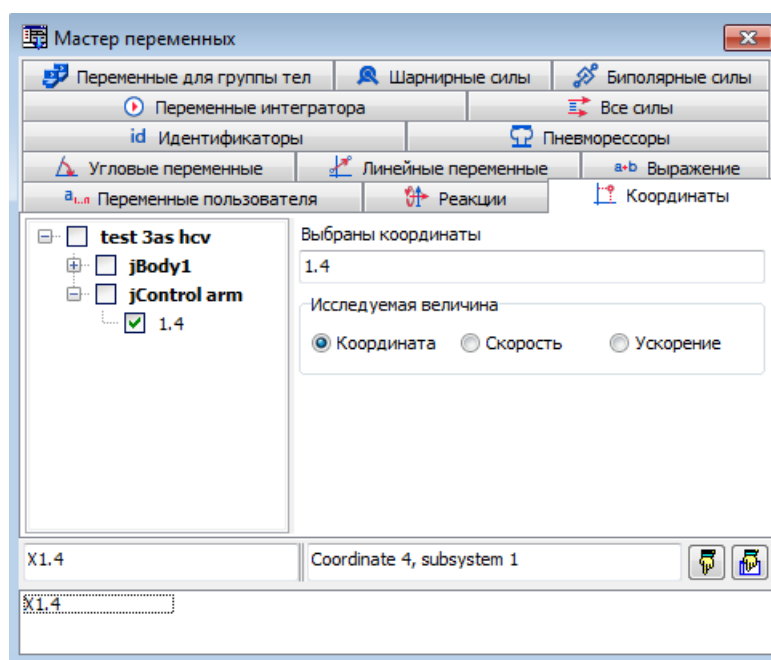



Рис. 31.119. Угол поворота рычага в радианах

- На вкладке **Выражение** создайте новый оператор умножения щелчком на кнопке . Мышкой перетащите переменную X1.4 из контейнера в поле первого сомножителя. В поле второго сомножителя внесите текст *rtod* – это стандартный внутренний идентификатор UM перевода радиан в градусы.
- Если знак координаты некорректен, то есть вместо впуска клапан открывает выхлоп, то следующим оператором у переменной можно изменить знак на противоположный, рис. 31.121.
- Переименуйте переменную в *HCV arm angle*, отошлите ее в контейнер и перетащите мышкой в таблицу описания клапана, рис. 31.120.

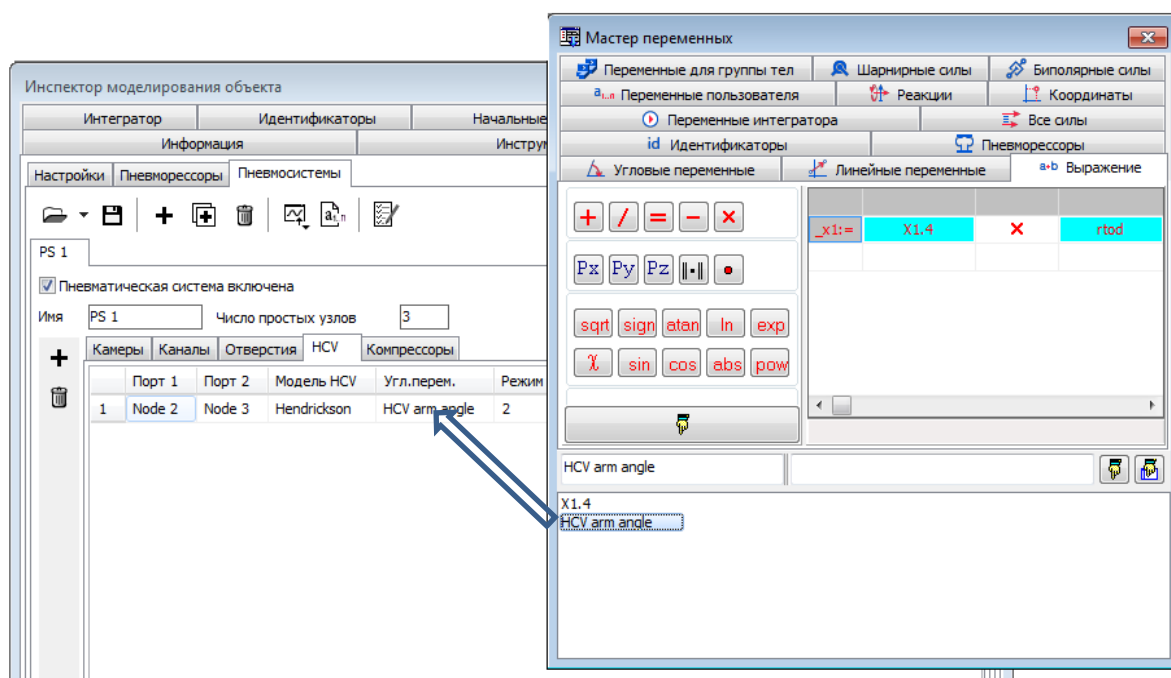


Рис. 31.120. Угол поворота рычага в градусах и его перемещение в таблицу описания клапана

_x1:=	X1.4	X	rtod
_x2:=	_x1	X	-1

Рис. 31.121. Изменение знака переменной

31.4.4.4. Динамические тесты с клапаном HCV

31.4.4.4.1. Общая информация о тестах

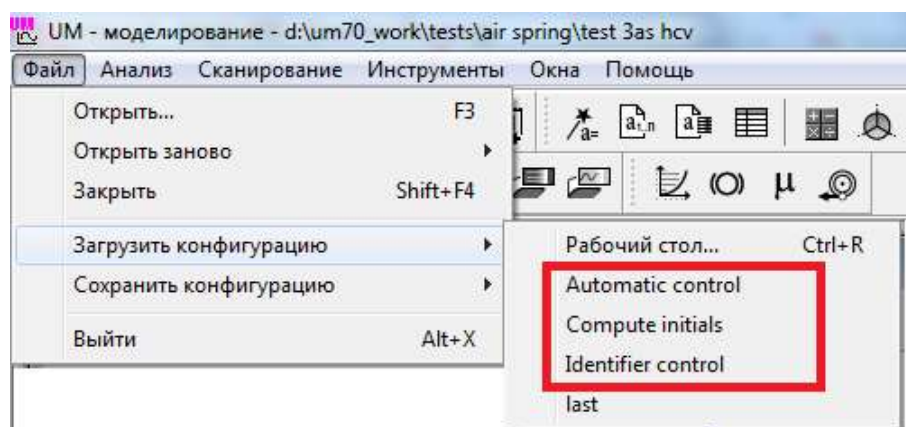


Рис. 31.122. Конфигурации тестов

Мы подготовили три теста, иллюстрирующих работу клапана контроля высоты. Для чтения настроек теста надо при загруженной модели стенда использовать команду основ-

ного меню **Файл | Загрузить конфигурацию** и выбрать один из трех вариантов (рис. 31.122):

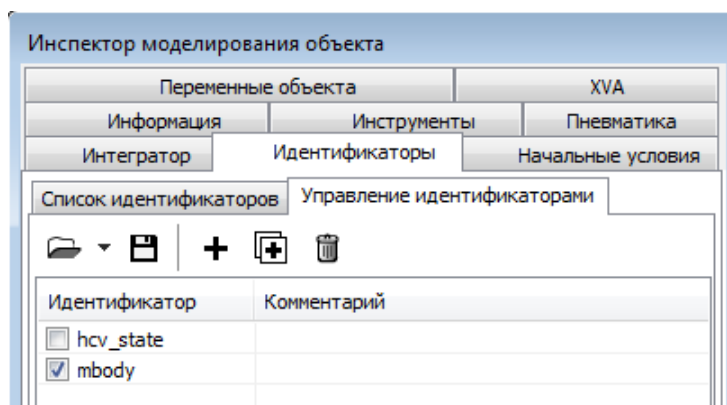
Automatic control (автоматическое управление)

Identifier control (управление идентификатором)

Compute initial (расчет начальных условий)

Во все трех тестах моделирование стартует из положения равновесия, при котором высота пневморессор меньше, чем желаемое значение, заданное идентификатором $h_{spring0}=0.5\text{м}$. То есть давление в пневморессорах ниже необходимого.

31.4.4.4.2. Тесты с управлением



Тест **Automatic control**

Идентификатор	Комментарий
<input checked="" type="checkbox"/> hcv_state	
<input checked="" type="checkbox"/> mbody	

Тест **Identifier control**

Идентификатор	Комментарий
<input type="checkbox"/> hcv_state	
<input type="checkbox"/> mbody	

Тест **Compute initials**

Рис. 31.123. Управление идентификаторами для различных тестов

Вкладка **Управление идентификаторами** содержит две записи: зависимость от времени массы тела *mbody* и идентификатора, параметризующего режим работы клапана *hcv_state* в случае теста **Identifier control**, рис. 31.123.

В тестах **Automatic control** и **Identifier control** изменяется масса тела Body (рис. 31.124), в тесте **Identifier control** активна зависимость от времени идентификатора *hcv_state* (рис. 31.125), при автоматическом управлении эта зависимость отключена, а режиму клапана присвоено значение 2.

Начиная с 50-й секунды моделирования масса в течение двух секунд уменьшается с 7.5 до 4.5 тонн. Управление идентификатором в тесте **Identifier control** синхронизировано с изменением массы. Клапан включается на 4-й секунде, чтобы установить нужную высоту рессоры при массе 7.5 тонн. На 50-й секунде клапан выключается, высота пружин увеличивается при уменьшении массы, и на 55-й секунде клапан вновь включается для сброса давления в рессорах. Аналогичные включения и выключения клапана в тесте **Automatic**

control происходит автоматически под управлением алгоритма, описанного в п. 31.3.2.2.5
Список клапанов HCV.

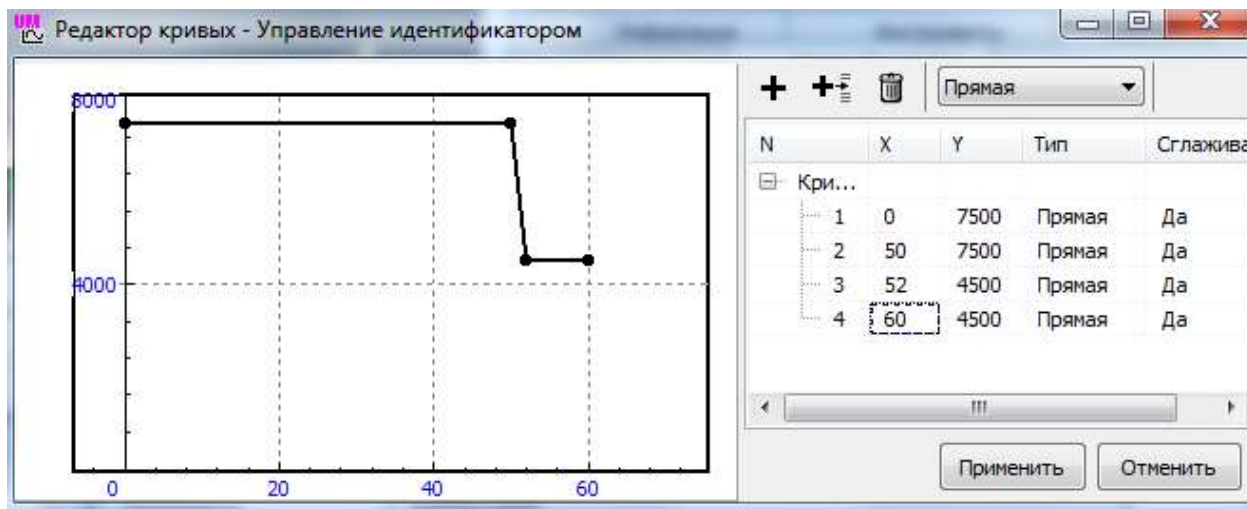


Рис. 31.124. Зависимость от времени массы тела

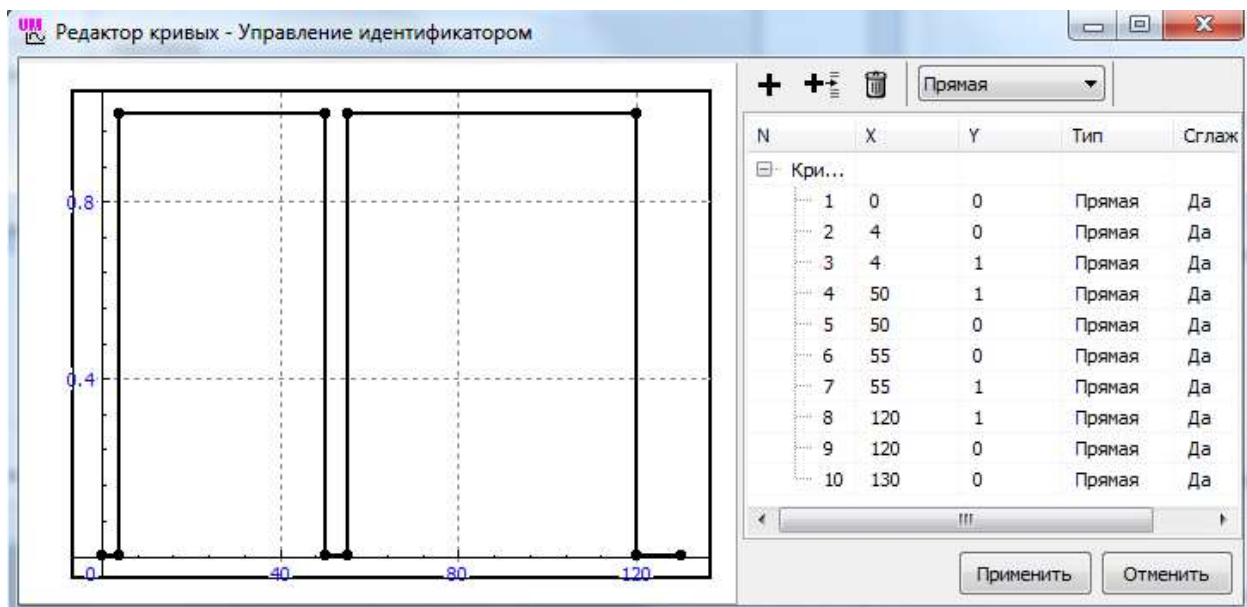


Рис. 31.125. Зависимость от времени идентификатора управления режимом клапана

Некоторые результаты тестов с управлением показаны на рис. 31.126 и рис. 31.127

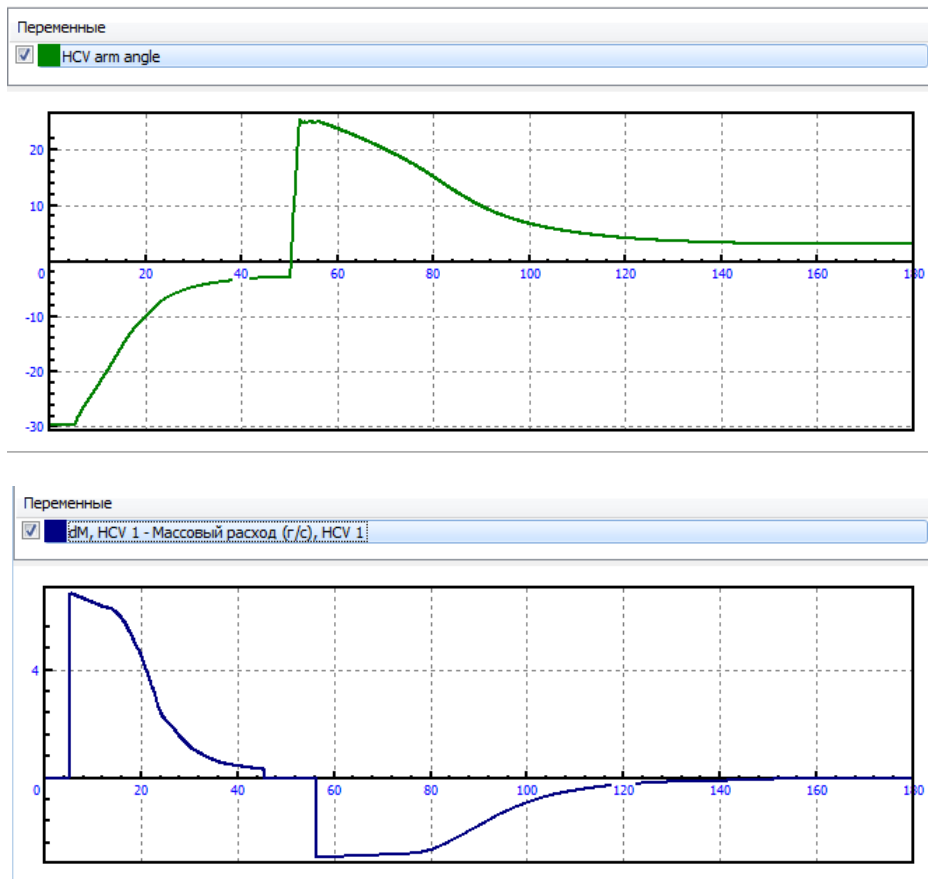


Рис. 31.126. Результаты теста **Automatic control**

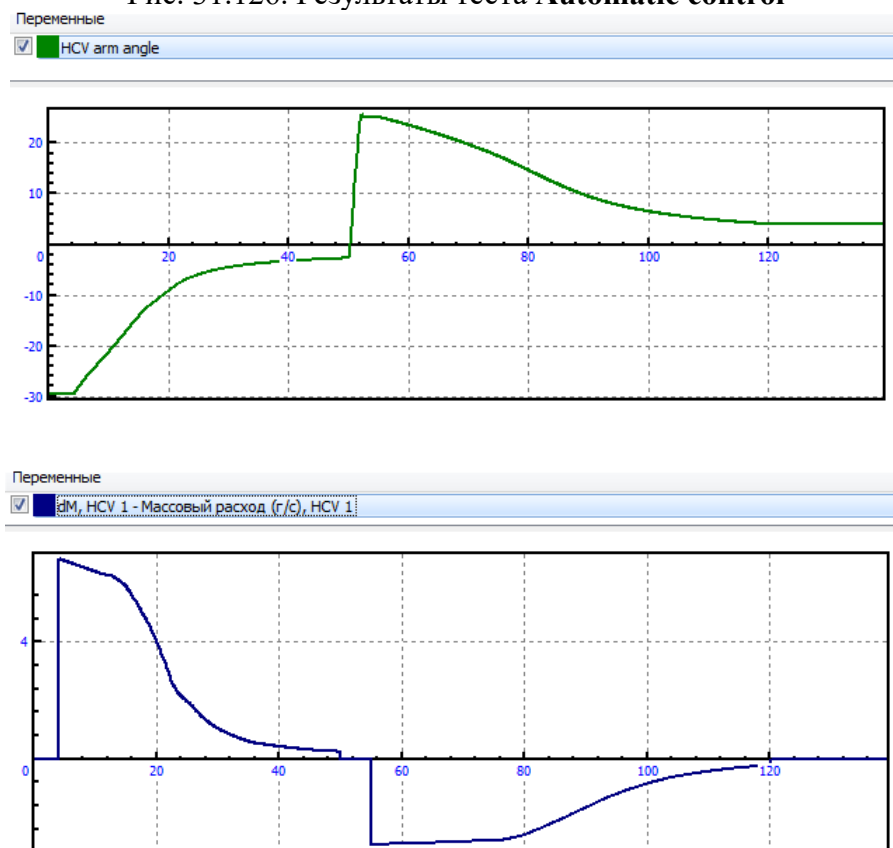


Рис. 31.127. Результаты теста **Identifier control**

31.4.4.4.3. Тест с расчетом начальных условий по давлениям и координатам

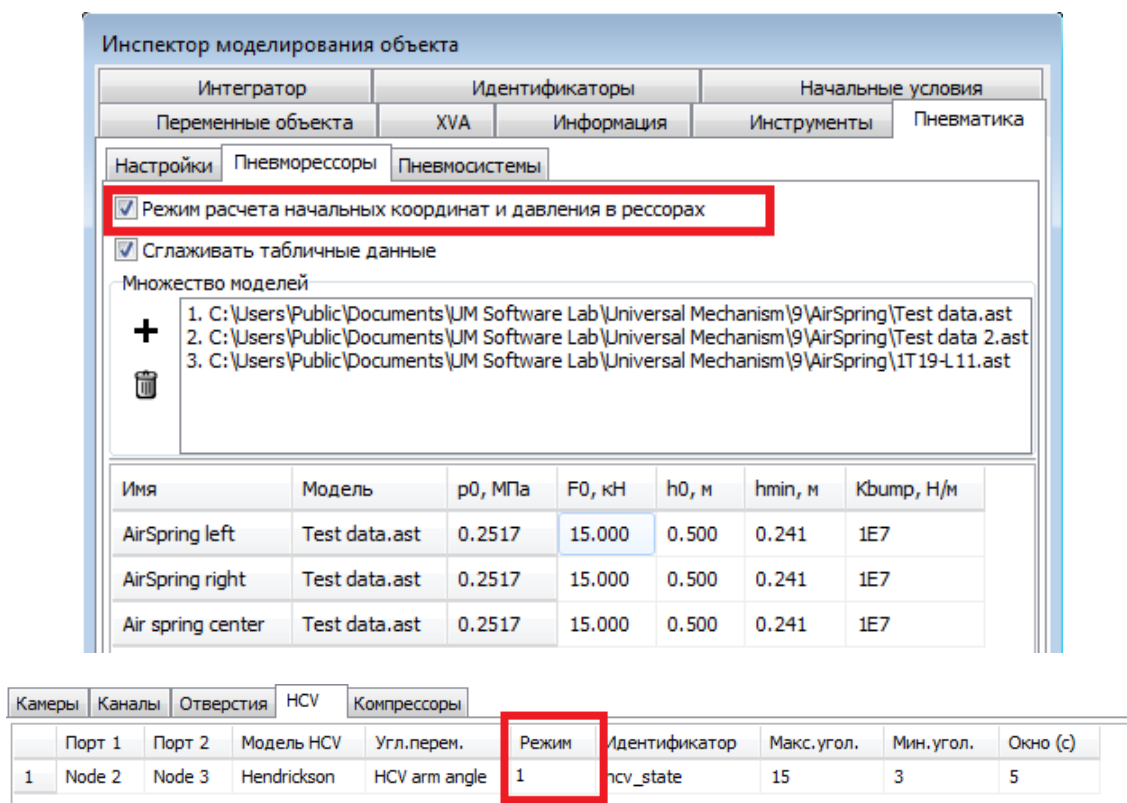


Рис. 31.128. Настройки теста **Compute initial**

Тест **Compute initial** показывает, каким образом можно рассчитать начальное равновесное состояние и давление в пневморессорах при заданной нагрузке и высоте подвески. Данные начальные условия можно использовать в последующих динамических тестах.

При моделировании автомобилей и рельсовых экипажей данный расчет должен проводиться при нулевой скорости автомобиля или вагона.

На рис. 31.128 показаны настройки теста:

- Должен быть включен **Режим расчета начальных координат и давлений в рессорах**.
- Клапану HCV следует задать либо режим 1 (включен) либо 2 (автоматическое управление). В режиме 2 не включится клапан, если угол поворота рычага управления меньше порогового значения (поле **Макс.угол** – 15 градусов на рис. 31.128). При необходимости надо уменьшить это значение, как и значение минимального угла.
- Управление идентификатором *hcv_state* должно быть выключено, рис. 31.123.

Моделирование следует выполнять до того момента, пока высота подвески не достигнет нужного значения (немного ниже заданного значения 0.5м), либо пока автоматическое управление не выключит клапан. После окончания теста следует подтвердить принятие расчетных значений, рис. 31.129. Новые значения давлений представлены на рис. 31.130.

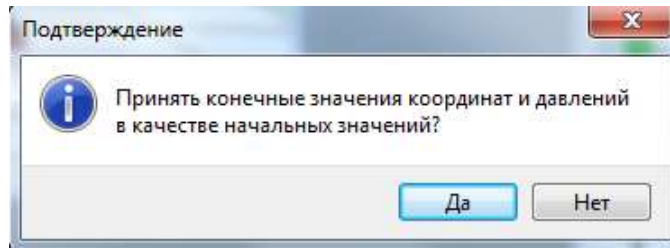


Рис. 31.129. Принятие результатов теста

Инспектор моделирования объекта

Интегратор	Идентификаторы		Начальные условия		
Переменные объекта	XVA	Информация	Инструменты	Пневматика	

Настройки | Пневморессоры | Пневмосистемы

Режим расчета начальных координат и давления в рессорах

Сглаживать табличные данные

Множество моделей

- 1. C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\9\AirSpring\Test data.ast
- 2. C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\9\AirSpring\Test data 2.ast
- 3. C:\Users\Public\Documents\UM Software Lab\Universal Mechanism\9\AirSpring\IT19-L11.ast

Имя	Модель	p_0 , МПа	F_0 , кН	h_0 , м	h_{min} , м	K_{bump} , Н/м
AirSpring left	Test data.ast	0.4029	24.529	0.494	0.241	1E7
AirSpring right	Test data.ast	0.4029	24.525	0.494	0.241	1E7
Air spring center	Test data.ast	0.4029	24.527	0.494	0.241	1E7

Рис. 31.130. Расчитанное давление, сила и высота для ПР

31.5. Сообщения об ошибках

Здесь мы рассмотрим сообщения, относящиеся к подготовке моделей ПС и процессу моделирования.

31.5.1. Ошибки создания моделей пневмосистем

PS Model: Узел не назначен "Имя"

Пневмотрубке или отверстию не назначен один узел, либо оба узла.

PS Model: Назначены одинаковые узлы "Имя"

Узлы, назначаемые трубке или отверстию, должны быть различные.

PS Model: Не назначена табличная модель для пневморессоры "Имя"

Файлы с моделями должны быть назначены всем табличным ПР, п. 31.3.1 *Параметры табличных пневморессор*.

PS Model: Пневморессора "Имя" включена в несколько активных пневмосистем

Табличная ПР может быть подключена только к одной активной пневмосистеме. Обычно эта ошибка возникает, когда пользователь создал несколько альтернативных пневматических систем, из которых только одна может быть активна. Неактивная пневмосистема должна быть выключена, п. 31.3.2.1 *Список пневмосистем*.

PS Model: Несовместимые значения статической силы и высоты для пневморессоры "Имя".

Заданное пользователем значение силы лежит вне интервала данных таблицы для заданного значения высоты, п. 31.3.1 *Параметры табличных пневморессор*. Измените высоту и/или силу (F_0 , h_0), рис. 31.45.

PS Model: Таблица силы некорректна "Имя"

Таблица для силы должна включать данные, по меньшей мере, для двух давлений и двух значений высоты.

Высота и давление должны увеличиваться с ростом номера строки и столбца.

См. п. 31.2.3.1.2. *Формат табличных данных*.

PS Model: Таблица объема некорректна "Имя"

Таблица объема должна включать данные как минимум для одного давления и двух значений высоты.

Объем должен увеличиваться с ростом как давления, так и высоты.

Высота и давление должны увеличиваться с ростом номера строки и столбца.

См. п. 31.2.3.1.2. *Формат табличных данных*.

31.5.2. Ошибки процесса моделирования

PS Sim: Итерации не сходятся

Программа не может решить систему уравнения для состояния пневмосистемы. Попробуйте изменить модель пневмотрубки.

PS Sim: Отрицательное давление. Расчет прерван

Определено отрицательное значение давления в одном из узлов. Моделирование не может продолжаться. Если ошибка проявляется опять, пожалуйста, обратитесь за консультацией к разработчикам UM.

Возможна также расходимость численных методов; см. рекомендации к сообщению: Шаг интегрирования слишком мал. Прерывание.

Шаг интегрирования слишком мал. Прерывание.

Метод интегрирования расходится. Если используется динамическая модель пневмотрубок, то рекомендуемые действия:

- увеличить значение параметров **Постоянная времени переключения клапана** и **Максимальное число итераций для динамических трубок**, п. 31.3.3 *Общие настройки моделирования пневмосистем*;
- использовать одну из стационарных моделей пневмотрубок;
- обратиться к разработчикам.

Список литературы

- [1] W. Sutherland, «The viscosity of gases and molecular force,» *Philosophical Magazine*, т. 36, № 5, pp. 507-531, 1893.
- [2] Firestone Industrial Products Company, «Airstroke actuators, Airmount isolators. Engineering Manual & Design Guide,» [В Интернете]. Available: <https://www.firestoneip.com/content/dam/fsip/pdfs/airstroke/Actuators-and-Isolators-Imperial-Design-Guide.pdf>. [Дата обращения: 14 December 2019].
- [3] Emerson Industrial Automation, «Numatics. Air Bellows,» [В Интернете]. Available: <https://www.asco.com/ASCO%20Asset%20Library/numatics-air-bellows-catalog.pdf>. [Дата обращения: 14 December 2019].
- [4] Firestone Industrial Product Company, «AirRail springs. Rail application design guide,» [В Интернете]. Available: <https://pdf.directindustry.com/pdf/firestone-industrial/airrail-springs-design-guide-rail/7273-380089.html#search-en-airrail>. [Дата обращения: 16 December 2019].
- [5] Firestone Industrial Product Company, «Airide design guide,» [В Интернете]. Available: <https://pdf.directindustry.com/pdf/tab/airide.html>. [Дата обращения: December 2019].
- [6] S. Fedorov, «GetData Graph Digitizer,» [В Интернете]. Available: <http://getdata-graph-digitizer.com>. [Дата обращения: 15 December 2019].
- [7] Nieto, A.J.; Morales, A.L.; Gonzalez, A.; Chicharro, J.M.; Pintado P., «An analytical model of pneumatic suspensions based on an experimental characterization,» *Journal of Sound and Vibration*, т. 313, pp. 290-307, 2008.
- [8] P. Beater, *Pneumatic Drives*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [9] E. J., «Simplified flow calculations for pneumatic components,» в *Andersson S B, Bévengut G, Eckersten J, Ek G, Kalldin B (eds) Atlas Copco Air Compendium*, Stockholm, Atlas Copco AB, 1975, p. 183–192.
- [10] A. Falkman, «Flow of gases in pipes,» в *Andersson S B, Bévengut G, Eckersten J, Ek G, Kalldin B (eds) Atlas Copco Air Compendium*, Stockholm, Atlas Copco AB, 1975, p. 149–192.
- [11] G. Brown, «The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance,» в *Environmental and Water Resources History*, Washington, American Society of Civil Engineers, 2003, pp. 34-43.
- [12] «Moody chart,» [В Интернете]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Moody_chart. [Дата обращения: 19 December 2019].
- [13] «Belforte G, Carello M, D’Alfio N,» в *Proc 4th Scandinavian Int Conf on Fluid Power*, pp 467–480, Tampere, 1995.
- [14] C. M. D. N. Belforte G, «Effects of geometry on flow in nonconventional pneumatic valves,» в *Proc 9th World Congress on Theory of Machines*. pp2680–2685, Politecnico di Milano, 1995.

- [15] Li-hong Yang and Cheng-liang Liu, «Measuring flow rate characteristics of a discharge valve based on a discharge thermodynamic,» *Meas. Sci. Technol.*, т. 17, p. 3272–3278, 2006.
- [16] Varga, Zdenek; Keski-Honkola, Petri, «Determination of flow rate characteristics for pneumatic valves,» в *Experimental Fluid Mechanics*, 2011.
- [17] Katsuya Toyofuku, Chuuji Yamada, Toshiharu Kagawa, Toshinori Fujita, «Study on dynamic characteristic analysis of air spring with auxiliary chamber,» *JSAE Review*, т. 20, № 3, pp. 349-355, 1999.
- [18] Kazuyuki Shimosawa; Takayuki Tohtake, «Air spring model with non-linear damping for vertical motion,» *Quarterly Report of RTRI*, т. 49, № 4, 2008.
- [19] «ENIDINE Product Brochures: Air Springs,» [В Интернете]. Available: <https://www.enidine.com/en-US/Resources/Technical-Data/>. [Дата обращения: 6 March 2020].