

**Методика составления цифровых моделей
гидравлических и пневматических систем в SimInTech
при помощи блоков библиотеки ГПС**

Содержание

Введение	3
Методика составления цифровой модели гидро- или пневмосистемы ...	6
Примеры моделирования гидравлических и пневматических систем ..	9
Приложение А. Пример №1. Моделирование работы гидравлического привода одностороннего действия	10
Приложение Б. Пример №2. Моделирование работы пневматического привода одностороннего действия	19
Приложение В. Пример №3. Моделирование работы однопоршневого компрессора	28
Приложение Г. Пример №4. Моделирование работы системы выдавливания воды	38
Приложение Д. Пример №5. Моделирование работы электропневмоклапана при подаче напряжения в процессе испытаний на время срабатывания	46
Приложение Е. Пример №6. Моделирование процесса охлаждения стального шара в холодильной камере	57

Введение

Гидравлические и пневматические системы находят широкое применение в ракетно-космической, авиационной, станкостроительной, судостроительной и других отраслях машиностроения. К подобным системам можно отнести гидро- и пневмоприводы станков, мобильных машин и судов, системы газоснабжения ракетно-космических комплексов, гидро- и пневмосистемы ракет-носителей и самолетов.

При проектировании и отработке гидро- и пневмосистем в большинстве случаев применяется численный эксперимент на основе математической цифровой модели с сосредоточенными параметрами.

Разработка такой модели ведется на основе единого (для гидро- и пневмосистем) подхода, в рамках которого первоначально формируется математическая модель системы, а затем разрабатывается программное обеспечение, реализующее эту модель.

Математическая модель системы формируется в несколько этапов. На первом этапе после анализа конструкции и принципа действия системы проводится операция декомпозиции, заключающаяся в условном разбиении системы на взаимосвязанные подсистемы различной физической природы. К указанным подсистемам относятся:

- **механическая подсистема**, к которой относятся процессы движения рабочих органов системы и связанных с ними деталей;
- **тепловая подсистема**, к которой относятся процессы теплопередачи между рабочей средой, деталями системы и окружающей средой;
- **гидродинамическая подсистема**, к которой относятся процессы течения рабочих сред через каналы системы;
- **электромагнитная подсистема**, к которой относятся процессы преобразования электрической энергии в магнитную;

- **термодинамическая подсистема**, к которой относятся процессы изменения параметров рабочих сред в междроссельных камерах или емкостях, а также процессы нагрева или охлаждения деталей системы.

На втором этапе проводится разбиение каждой из подсистем на элементы, к которым относятся:

- **механический элемент** – одна или несколько связанных подвижных деталей системы, параметры движения (перемещение, скорость, ускорение) которых можно считать одинаковыми в каждый момент времени;
- **термодинамический элемент** – ограниченный объем вещества (газообразного, жидкого, твердого), термодинамические параметры в каждой точке которого можно считать одинаковыми; для газообразных и жидких сред дополнительным условием является малый вклад кинетической энергии в полную энергию вещества в рассматриваемом объеме;
- **гидродинамический элемент** – канал системы той или иной формы, по которому течет рабочая среда;
- **электромагнитный элемент** – совокупность неподвижных деталей системы, позволяющих преобразовывать электрическую энергию в силу или момент, действующие на связанный механический элемент;
- **тепловой элемент** – условный объем материи малой толщины, разделяющий два контактирующих друг с другом термодинамических элемента и имеющий термическое сопротивление.

На третьем этапе проводится формализация процессов, происходящих в каждом из элементов каждой из подсистем, т.е. разрабатываются математические модели элементов.

На заключительном этапе проводится композиция разработанных моделей элементов с учетом их взаимосвязей. Результатом является математическая модель системы.

Сложность структуры гидро- и пневмосистем и наличие нескольких видов протекающих в них физических процессов зачастую приводят к значительным временным затратам на разработку математического описания и его реализацию в виде программы для ЭВМ.

Библиотека ГПС (гидро- и пневмосистем) SimInTech представляет собой набор специальных блоков, суть, цифровых моделей указанных выше элементов подсистем. При этом каждый элемент представлен в библиотеке несколькими цифровыми моделями, отличающимися особенностями описываемых процессов. Соединение блоков между собой в соответствии с имеющимися в системе связями дает цифровую модель рассматриваемой гидро- или пневмосистемы.

Использование библиотеки ГПС в рамках SimInTech позволяет миновать процесс создания математической модели и разработки программного обеспечения и непосредственно перейти от расчетной схемы к цифровой модели системы.

Методика составления цифровой модели гидро- или пневмосистемы

В общем случае для составления цифровой модели гидравлической или пневматической системы в программном комплексе SimInTech необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1 Провести анализ конструкции и принципа действия системы

1.1 Выполнить следующие действия:

- выделить в системе подвижные детали и сформировать из них группы, в каждой из которых параметры движения деталей (перемещение, скорость, ускорение) можно считать одинаковыми в каждый момент времени;
- выделить в системе объемы (полости) с рабочей средой, в каждой точке которых термодинамические параметры среды можно считать одинаковыми в каждый момент времени, а кинетической энергией среды в общем балансе ее энергии можно пренебречь;
- выделить в системе каналы, по которым течет рабочая среда; рассмотреть возможность объединения нескольких параллельных каналов в один эквивалентный;
- для каналов, образованных дроссельными элементами, определить тип дросселей; для регулируемых дросселей определить параметр, определяющий величину площади их проходного сечения, и выделить характерные элементы (затвор, седло, регулирующий элемент и т.п.);
- оценить степень влияния теплообмена на характер происходящих процессов, тем самым определив необходимость учета в модели процессов передачи тепла;
- в случае принятия решения об учете теплообменных процессов выделить в системе объемы деталей, термодинамические параметры в каждой точке которых можно считать одинаковыми;

- в случае принятия решения об учете теплообменных процессов определить вид теплопередачи между рабочей средой, поверхностями деталей и окружающей средой (свободная конвекция в большом объеме, свободная конвекция в малом объеме, вынужденная конвекция и т.п.);
- выделить в системе электромагнитные элементы.

1.2 На основе результатов выполнения указанных выше действий сформировать перечень элементов механической, термодинамической, гидродинамической, тепловой и электромагнитной подсистем рассматриваемой системы.

Присвоить уникальное название каждому элементу подсистем. Например, «поршень-шток-нагрузка», «дроссель «сопло-заслонка», «рабочая полость гидроцилиндра» и т.д.

1.3 Сформировать схему связей элементов подсистем (в графической, текстовой или табличной форме). В графической форме схема должна представлять собой совокупность условно обозначенных (например, названием элемента, обрамленным прямоугольником) элементов подсистем, соединенных линиями.

2 Сформировать расчетную схему системы и перечень исходных данных

2.1 Сформировать перечень принятых условий и допущений. Желательно сделать отдельный список допущений для каждого элемента подсистемы из перечня пункта 1.2.

2.2 Сформировать расчетную схему системы, в основе которой использовать принципиальную схему. На расчетной схеме выделить (например, цветом, штриховкой, замкнутыми прерывистыми линиями и т.п.) элементы подсистем и указать для них: названия (см. подпункт 1.2), обозначения (например, p_1 , T_1 , x_1 и т.п.) и значения (начальные, постоянные) их характерных параметров (например, начальных давлений и температур среды в полостях, масс, перемещений и скоростей подвижных деталей).

2.3 Сформировать перечень параметров элементов подсистем, достаточный для идентификации цифровой модели системы (например, масса подвижных деталей, диаметр и коэффициент расхода дросселя, площадь поверхности теплообмена и т.п.). Составить таблицу исходных данных, в которой указать название параметра, его значение и единицы измерения.

3 Пользуясь описанием блоков библиотеки ГПС для каждого элемента подсистем (из перечня подпункта 1.2) с учетом принятых условий и допущений (см. подпункт 2.1) выбрать соответствующий блок. Перенести выбранные блоки в рабочее окно программы SimInTech. Присвоить блокам имена в соответствии с подпунктом 1.2.

В случае отсутствия в библиотеке подходящего блока пересмотреть перечень условий и допущений (см. подпункт 2.1) для соответствующего элемента и повторить операцию поиска блока.

4 Соединить выбранные блоки библиотеки линиями связи в соответствии со схемой связей (см. подпункт 1.3). Для каждого блока задать значения его свойств в соответствии с таблицей исходных данных (см. подпункт 2.3).

5. Установить параметры расчета. Рекомендуются следующие общие настройки расчета:

- метод интегрирования: Адаптивный 1 или Адаптивный 5;
- максимальный шаг интегрирования: не более 10^{-2} ;
- метод итерации петель: Ньютона-Рафсона;
- максимальное количество итераций: не менее 100.

Примеры моделирования гидравлических и пневматических систем

В приложениях А-Е приведены примеры моделирования гидравлических и пневматических систем в программном комплексе SimInTech с использованием библиотеки ГПС.

Приложение А содержит пример составления модели и моделирования работы гидравлического привода одностороннего действия.

Приложение Б содержит пример составления модели и моделирования работы пневматического привода одностороннего действия.

Приложение В содержит пример составления модели и моделирования работы однопоршневого компрессора.

Приложение Г содержит пример составления модели и моделирования работы системы выдавливания воды.

Приложение Д содержит пример составления модели и моделирования работы электропневмоклапана при подаче напряжения в процессе испытаний на время срабатывания.

Приложение Е содержит пример составления модели и моделирования процесса охлаждения стального шара в холодильной камере.

Приложение А

Пример №1. Моделирование работы гидравлического привода одностороннего действия

Описание задачи

Рассматривается гидравлический привод с одной рабочей полостью (рисунок А.1). Управление перемещением исполнительного органа (поршень-штока) и соединенной с ним инерционной нагрузки происходит путем наполнения/опоражнивания рабочей полости через распределитель.

Распределитель имеет две рабочие позиции. В первой позиции распределитель соединяет источник рабочей среды с рабочей полостью гидроцилиндра, а во второй – рабочую полость гидроцилиндра и бак. Первая позиция распределителя обеспечивает наполнение рабочей полости, а вторая – ее опоражнение.

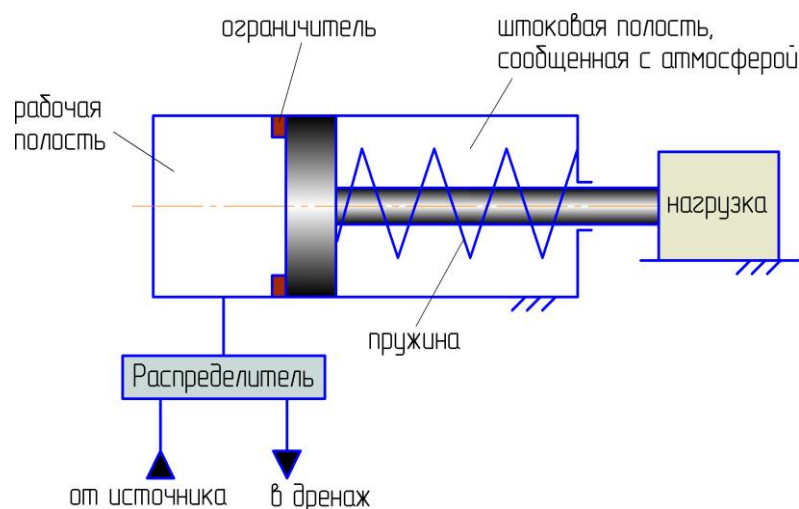


Рисунок А.1 – Принципиальная схема гидравлического привода

Задача: Требуется смоделировать процесс перемещения нагрузки привода при смене позиций распределителя и рассчитать переходные процессы:

- по перемещению исполнительного органа;
- по давлению рабочей среды в рабочей полости гидроцилиндра.

Исходные данные:

Исходные данные приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 – Исходные данные для моделирования

Параметр	Единицы	Значение
Рабочая среда	–	масло АМГ-10
Абсолютное давление рабочей среды в источнике	МПа	1,4
Температура рабочей среды в источнике	К	293
Масса поршень-штока гидроцилиндра и связанных с ним пружины и нагрузки	кг	0,5
Усилие, передаваемое на поршень-шток гидроцилиндра пружиной, при нулевом перемещении первого	Н	300
Жесткость пружины	Н/м	7000
Коэффициент вязкого трения на подвижных элементах гидроцилиндра	Н/(м/с)	500
Максимальное перемещение поршень-штока гидроцилиндра	м	0,3
Площадь поршень-штока, на которую действует давление в рабочей полости	м ²	$19,635 \cdot 10^{-4}$
Площадь поршень-штока, на которую действует давление окружающей среды	м ²	$19,635 \cdot 10^{-4}$
Сила сухого трения на поршень-штоке при движении	Н	50
Сила сухого трения на поршень-штоке при страгивании	Н	50
Объем рабочей полости гидроцилиндра при нулевом перемещении поршень-штока	м ³	$5 \cdot 10^{-4}$
Абсолютное давление окружающей среды	МПа	0,1
Абсолютное давление рабочей среды в баке	МПа	0,1
Температура рабочей среды в баке	К	293
Эквивалентный диаметр канала, соединяющего источник рабочей среды и рабочую полость гидроцилиндра	м	$4 \cdot 10^{-3}$
Эквивалентный диаметр канала, соединяющего рабочую полость гидроцилиндра и бак	м	$4 \cdot 10^{-3}$

Принятые допущения и расчетная схема

Примем следующие допущения:

- принимаем начальное абсолютное давление и температуру рабочей среды в рабочей полости гидроцилиндра равными давлению и температуре в источнике;
- пренебрегаем процессами теплообмена между рабочей средой и стенками каналов и гидроцилиндра;
- канал, соединяющий источник рабочей среды и рабочую полость гидроцилиндра, моделируем постоянным дросселем;

- канал, соединяющий рабочую полость гидроцилиндра и дренажный коллектор, моделируем постоянным дросселем;
- принимаем, что смена рабочей позиции распределителя происходит мгновенно вслед за подачей соответствующего управляющего сигнала;
- принимаем, что штоковая полость гидроцилиндра сообщена с окружающей средой каналом большого сечения, т.е. значения параметров среды в этой полости можно считать равными значениям параметров окружающей среды.

С учетом принятых допущений разобьем моделируемую систему (гидропривод с нагрузкой) на связанные подсистемы различной физической природы:

- **механическая подсистема:**
 - **механический элемент №1**, имитирующий исполнительный орган гидроцилиндра и связанную с ним нагрузку.
- **гидродинамическая подсистема:**
 - **дроссель №1**, имитирующий канал, соединяющий рабочую полость гидроцилиндра с источником рабочей среды;
 - **дроссель №2**, имитирующий канал, соединяющий рабочую полость гидроцилиндра с баком.
- **термодинамическая подсистема:**
 - **полость №1**, имитирующая источник рабочей среды;
 - **полость №2**, имитирующая рабочую полость гидроцилиндра;
 - **полость №3**, имитирующая штоковую полость гидроцилиндра;
 - **полость №4**, имитирующая бак.

Расчетная схема для моделирования работы гидравлического привода приведена на рисунке А.2.

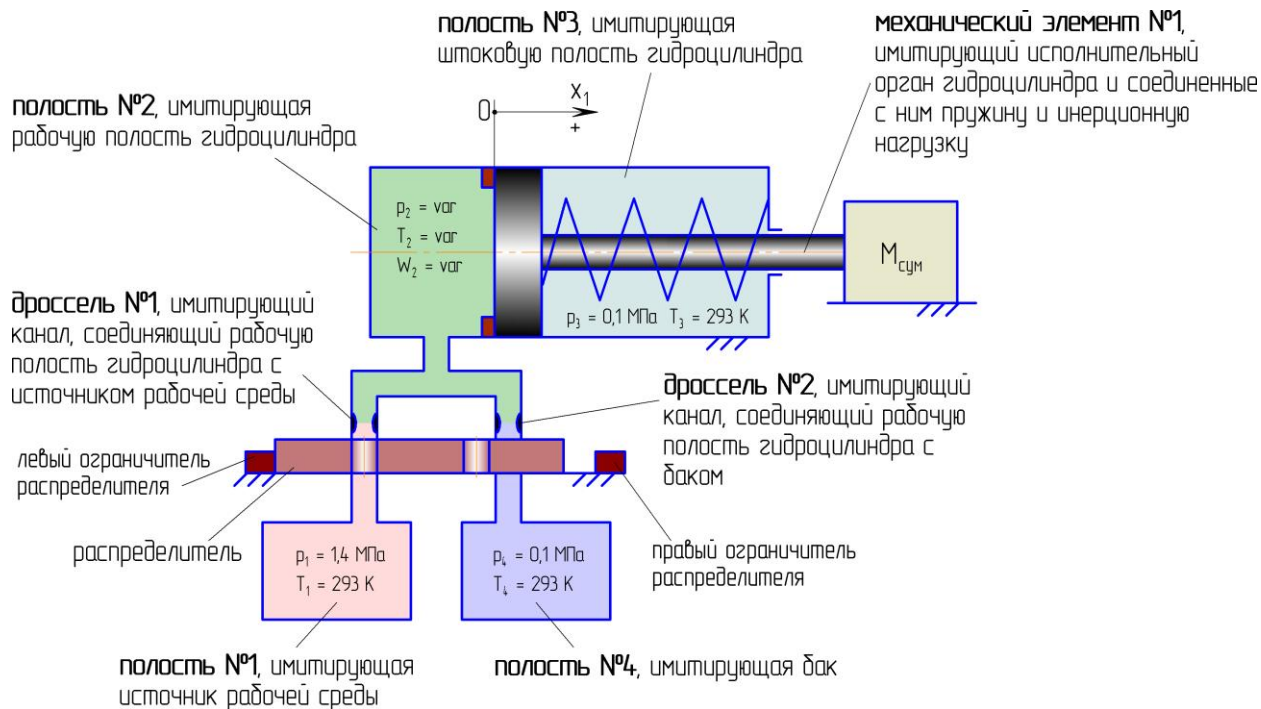


Рисунок А.2 – Расчетная схема для моделирования работы гидравлического привода

Формирование модели в SimInTech

Для моделирования отдельных объектов (указанных на рисунке А.2) в SimInTech, в соответствии с принятыми допущениями и расчетной схемой, необходимо использовать блоки библиотеки «ГПС», указанные в таблице А.2.

Таблица А.2 – Моделируемые объекты и соответствующие блоки библиотеки «ГПС»

Моделируемый объект (рисунок А.2)	Блок библиотеки «ГПС»
механический элемент №1	«Механический элемент поступательного движения»
дроссель №1	«Гидравлический турбулентный дроссель с регулированием по произвольному параметру»
дроссель №2	«Гидравлический турбулентный дроссель с регулированием по произвольному параметру»
полость №1	«Полость с постоянными параметрами жидкости»

Моделируемый объект (рисунок А.2)	Блок библиотеки «ГПС»
полость №2	«Теплоизолированная полость переменного объема с постоянной температурой»
полость №3	«Полость с постоянными параметрами газа»
полость №4	«Полость с постоянными параметрами жидкости»

Для осуществления связей между блоками, моделирующими отдельные объекты, используются блоки «Размножитель механический» и «Размножитель полостной».

Управление распределителем смоделировано с помощью стандартных блоков SimInTech типа «Ключ» и «Константа».

Механический элемент №1 (рисунок А.2) также можно смоделировать с использованием блоков библиотеки «Механика» (рисунок А.3). В этом случае для осуществления связей между блоками библиотек «ГПС» и «Механика» необходимо использовать блок «Переходник из Механики в ГПС», входящий в библиотеку «ГПС».

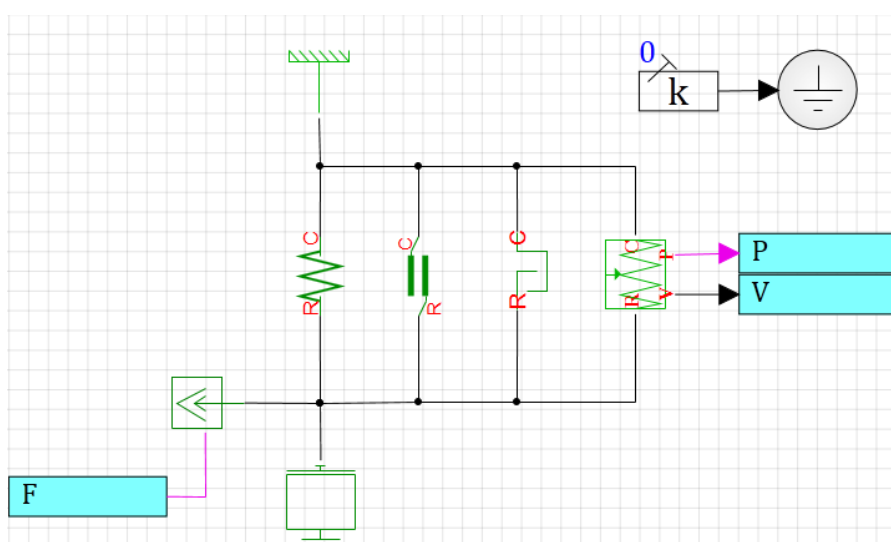


Рисунок А.3 – Модель механического элемента №1, сформированная из блоков библиотеки «Механика»

Модель гидропривода, сформированная в SimInTech из блоков библиотеки «ГПС», приведена на рисунке А.4, а из блоков библиотек «ГПС» и «Механика» – на рисунке А.5.

Для моделей установлены следующие параметры расчета:

- метод интегрирования: Адаптивный 1;
- минимальный шаг интегрирования: 10^{-7} ;
- максимальный шаг интегрирования: 10^{-3} ;
- конечное время расчета: $1 \cdot 10^5$;
- метод итерации петель: Ньютона-Рафсона;
- максимальное количество итераций: 100.

Значения свойств отдельных блоков модели приведены на рисунках А.6-А.13.

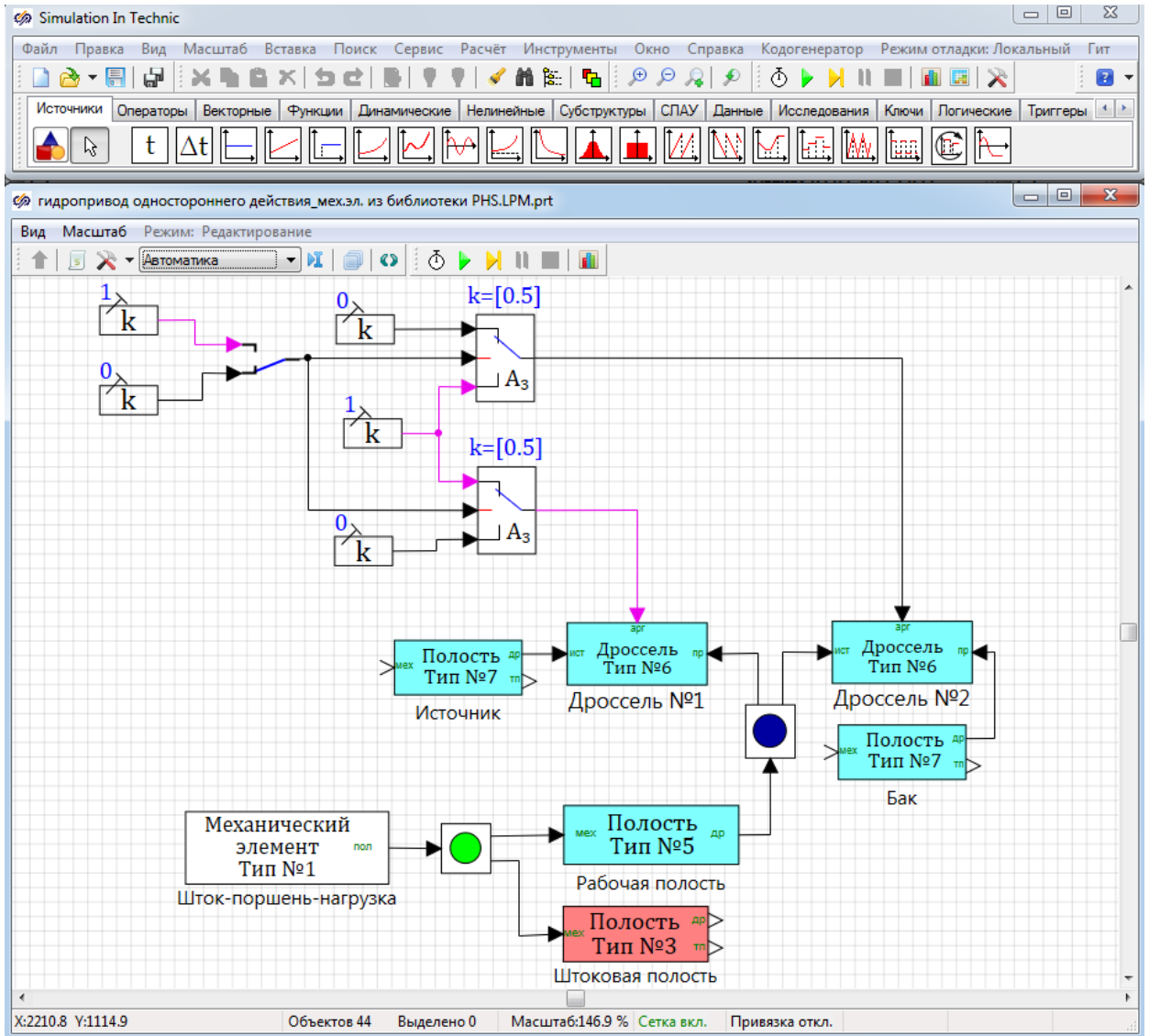


Рисунок А.4 – Модель гидропривода одностороннего действия, сформированная из блоков библиотеки «ГПС»

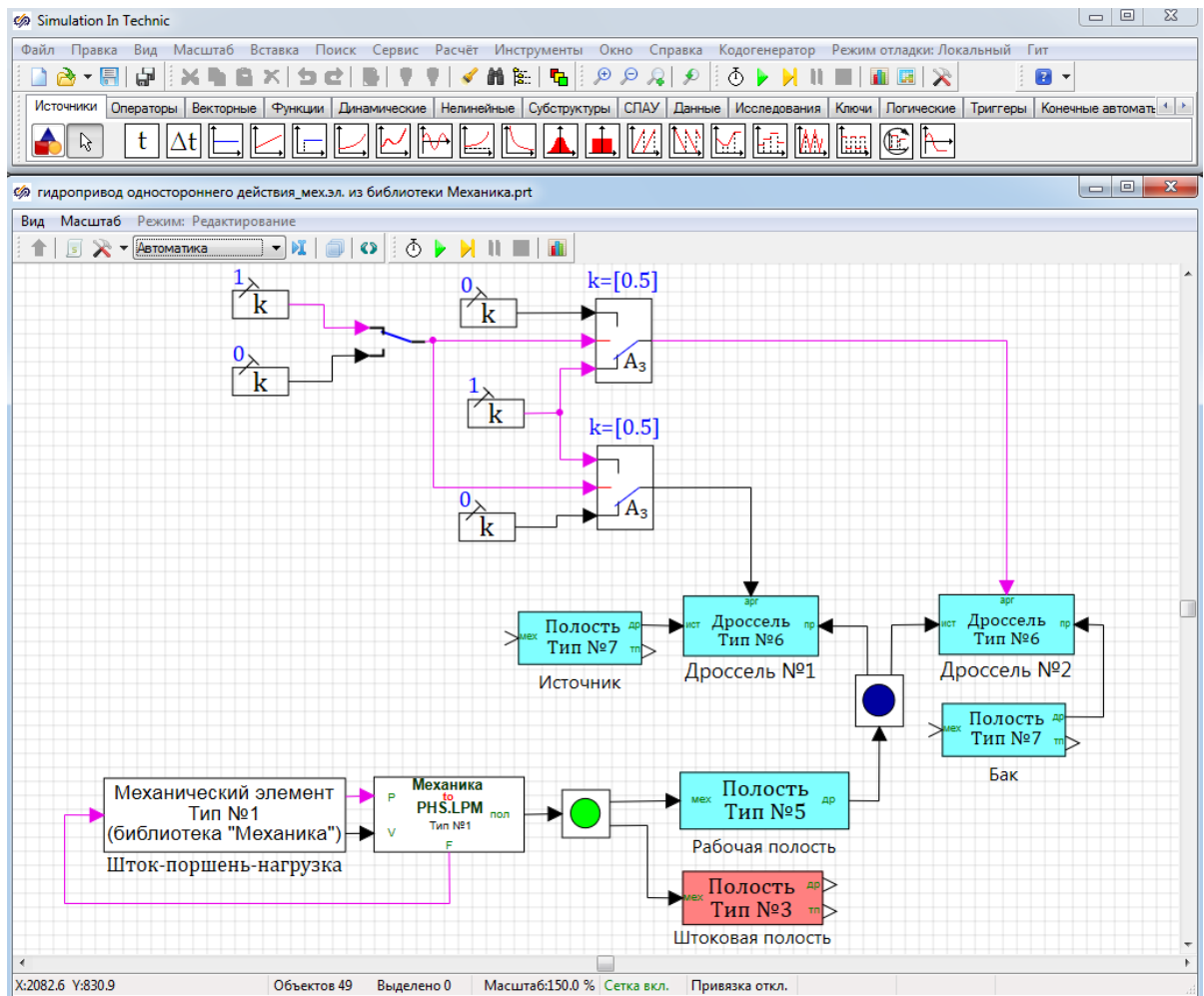


Рисунок А.5 – Модель гидропривода одностороннего действия, сформированная из блоков библиотек «ГПС» и «Механика»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	1.4e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	293
Рабочая среда	liquid_type	масло АМГ-10

Рисунок А.6 – Свойства блока, обозначенного как «Источник»

Название	Имя	Значение
Количество полостей, связанных с рассматриваемым механическим элементом	N_pol	2
Масса механического элемента, кг	M_el	0.5
Усилие от позиционной нагрузки (от действия упругих элементов) при нулевом перемещении механического элемента, Н	Fupr_0	300
Эквивалентная жесткость упругих элементов, Н/м	c_upr	7000
Коэффициент вязкого трения, Н/(м/с)	Kv_tr	600
Начальное перемещение механического элемента, м	X_0	0.3
Начальная скорость механического элемента, м/с	V_0	0
Минимально возможное перемещение механического элемента, м	X_min	0
Максимально возможное перемещение механического элемента, м	X_max	0.3
Вектор значений площадей механического элемента, на которые действуют давления в связанных полостях, м ²	S_p	[19.635e-4; -19.635e-4]
Сила сухого трения движения, Н	Ftr_dvizh	50
Сила сухого трения страгивания, Н	Ftr_str	50

Рисунок А.7 – Свойства блока, обозначенного как «Шток-поршень-нагрузка»

Название	Имя	Значение
Начальное абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_0	1.4e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_0	293
Объем полости при нулевых перемещениях связанных с ней механических элементов, м ³	W_x_0	5e-4
Вектор начальных перемещений связанных механических элементов, м	X_0	[0.3]
Количество дросселей (каналов), связанных с полостью	N_dr	2
Количество механических элементов, связанных с полостью	N_meh	1
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления объемной связи блоков "Полость. Тип №5" и "Механический элемент", м ²	S_meh_W	[19.635e-4]
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления силовой связи блоков "Полость. Тип №5" и "Механический элемент", м ²	S_meh_p	[19.635e-4]
Рабочая среда	liquid_type	масло АМГ-10
Модуль объемной упругости рабочей среды	bulk_modulus	адиабатный
Нижнее ограничение по абсолютному давлению рабочей среды в полости, Па	p_min	0.001e6

Рисунок А.8 – Свойства блока, обозначенного как «Рабочая полость»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	0.1e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	293
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок А.9 – Свойства блока, обозначенного как «Штоковая полость»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	0.1e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	293
Рабочая среда	liquid_type	масло АМГ-10

Рисунок А.10 – Свойства блока, обозначенного как «Бак»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_prjam	1
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	1
Вектор значений аргумента (x, м или t, сек или p, Па или др.)	argument	[0;1e-10;100]
Вектор значений площади проходного сечения дросселя, м ²	func	[0;pi*(4e-3) ² /4;pi*(4e-3) ² /4]
Рабочая среда	liquid_type	масло АМГ-10

Рисунок А.11 – Свойства блока, обозначенного как «Дроссель №1»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_prjam	1
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	1
Вектор значений аргумента (x, м или t, сек или p, Па или др.)	argument	[0;1e-10;100]
Вектор значений площади проходного сечения дросселя, м ²	func	[0;pi*(4e-3) ² /4;pi*(4e-3) ² /4]
Рабочая среда	liquid_type	масло АМГ-10

Рисунок А.12 – Свойства блока, обозначенного как «Дроссель №2»

Название	Имя	Значение
Количество полостей, связанных с механическим элементом	N_pol	2
Вектор значений площадей механического элемента, на которые действуют давления в связанных полостях, м ²	S_p	[19.635e-4;19.635e-4]

Рисунок А.13 – Свойства блока «Переходник из Механики в ГПС»

Результаты моделирования в SimInTech

Результаты моделирования процессов в гидроприводе при смене позиций распределителя приведены на рисунках А.14, А.15.

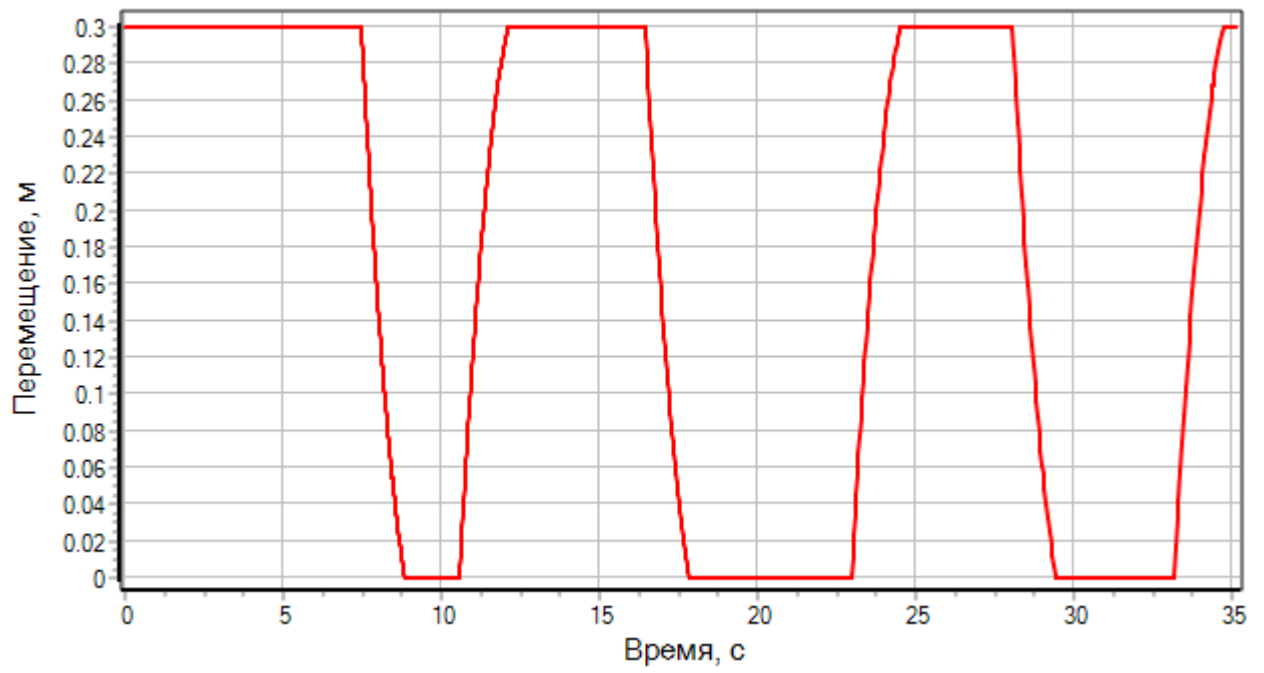


Рисунок А.14 – Переходный процесс по перемещению исполнительного органа

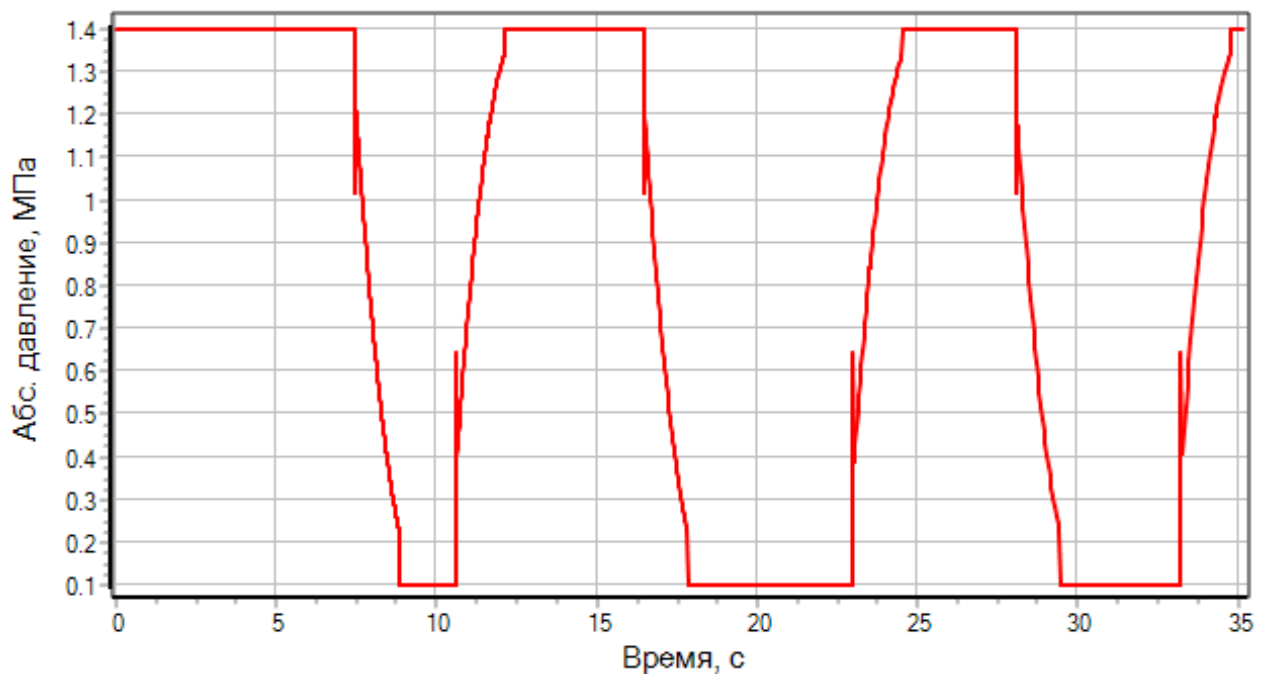


Рисунок А.15 – Переходный процесс по абсолютному давлению рабочей среды в рабочей полости гидроцилиндра

Приложение Б

Пример №2. Моделирование работы пневматического привода одностороннего действия

Описание задачи

Рассматривается пневматический привод с одной рабочей полостью (рисунок Б.1). Управление перемещением исполнительного органа (поршень-штока) и соединенной с ним инерционной нагрузки происходит путем наполнения/опоражнивания рабочей полости через распределитель.

Распределитель имеет две рабочие позиции. В первой позиции распределитель соединяет источник рабочей среды с рабочей полостью пневмоцилиндра, а во второй – рабочую полость пневмоцилиндра и дренажный коллектор. Первая позиция распределителя обеспечивает наполнение рабочей полости, а вторая – ее опоражнивание.

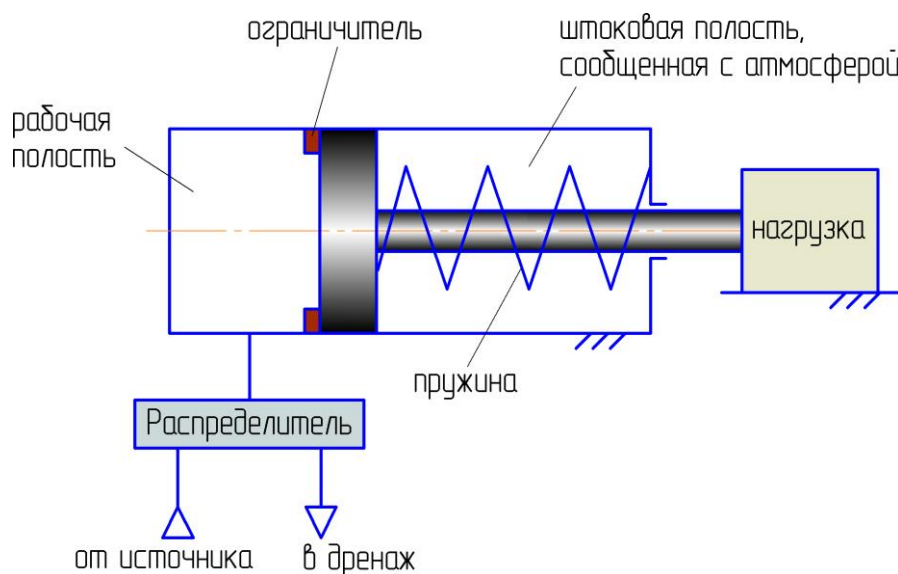


Рисунок Б.1 – Принципиальная схема пневматического привода

Задача: Требуется смоделировать процесс перемещения нагрузки привода при смене позиций распределителя и рассчитать переходные процессы:

- по перемещению исполнительного органа;

- по давлению рабочей среды в рабочей полости пневмоцилиндра.

Исходные данные:

Исходные данные приведены в таблице Б.1.

Таблица Б.1 – Исходные данные для моделирования

Параметр	Единицы	Значение
Рабочая среда	–	воздух
Абсолютное давление рабочей среды в источнике	МПа	0,4
Температура рабочей среды в источнике	К	293
Масса поршень-штока пневмоцилиндра и связанных с ним пружины и нагрузки	кг	0,1
Усилие, передаваемое на поршень-шток пневмоцилиндра пружиной, при нулевом перемещении первого	Н	150
Жесткость пружины	Н/м	1160
Коэффициент вязкого трения на подвижных элементах пневмоцилиндра	Н/(м/с)	500
Максимальное перемещение поршень-штока пневмоцилиндра	м	0,3
Площадь поршень-штока, на которую действует давление в рабочей полости	м ²	$19,635 \cdot 10^{-4}$
Площадь поршень-штока, на которую действует давление окружающей среды	м ²	$19,635 \cdot 10^{-4}$
Сила сухого трения на поршень-штоке при движении	Н	50
Сила сухого трения на поршень-штоке при страгивании	Н	50
Объем рабочей полости пневмоцилиндра при нулевом перемещении поршень-штока	м ³	$5 \cdot 10^{-5}$
Абсолютное давление окружающей среды	МПа	0,1
Абсолютное давление рабочей среды в дренажном коллекторе	МПа	0,1
Температура рабочей среды в дренажном коллекторе	К	293
Эквивалентный диаметр канала, соединяющего источник рабочей среды и рабочую полость пневмоцилиндра	м	$4 \cdot 10^{-3}$
Эквивалентный диаметр канала, соединяющего рабочую полость пневмоцилиндра и дренажный коллектор	м	$8 \cdot 10^{-3}$

Принятые допущения и расчетная схема

Примем следующие допущения:

- принимаем начальное абсолютное давление и температуру рабочей среды в рабочей полости пневмоцилиндра равными давлению и температуре в источнике;
- пренебрегаем процессами теплообмена между рабочей средой и стенками каналов и пневмоцилиндра;

- канал, соединяющий источник рабочей среды и рабочую полость пневмоцилиндра, моделируем постоянным дросселем;
- канал, соединяющий рабочую полость пневмоцилиндра и дренажный коллектор, моделируем постоянным дросселем;
- принимаем, что смена рабочей позиции распределителя происходит мгновенно вслед за подачей соответствующего управляющего сигнала;
- принимаем, что штоковая полость пневмоцилиндра сообщена с окружающей средой каналом большого сечения, т.е. значения параметров среды в этой полости можно считать равными значениям параметров окружающей среды.

С учетом принятых допущений разобьем моделируемую систему (пневмопривод с нагрузкой) на связанные подсистемы различной физической природы:

- **механическая подсистема:**
 - **механический элемент №1**, имитирующий исполнительный орган пневмоцилиндра и связанную с ним нагрузку.
- **гидродинамическая подсистема:**
 - **дроссель №1**, имитирующий канал, соединяющий рабочую полость пневмоцилиндра с источником рабочей среды;
 - **дроссель №2**, имитирующий канал, соединяющий рабочую полость пневмоцилиндра с дренажным коллектором.
- **термодинамическая подсистема:**
 - **полость №1**, имитирующая источник рабочей среды;
 - **полость №2**, имитирующая рабочую полость пневмоцилиндра;
 - **полость №3**, имитирующая штоковую полость пневмоцилиндра;
 - **полость №4**, имитирующая дренажный коллектор.

Расчетная схема для моделирования работы пневматического привода приведена на рисунке Б.2.

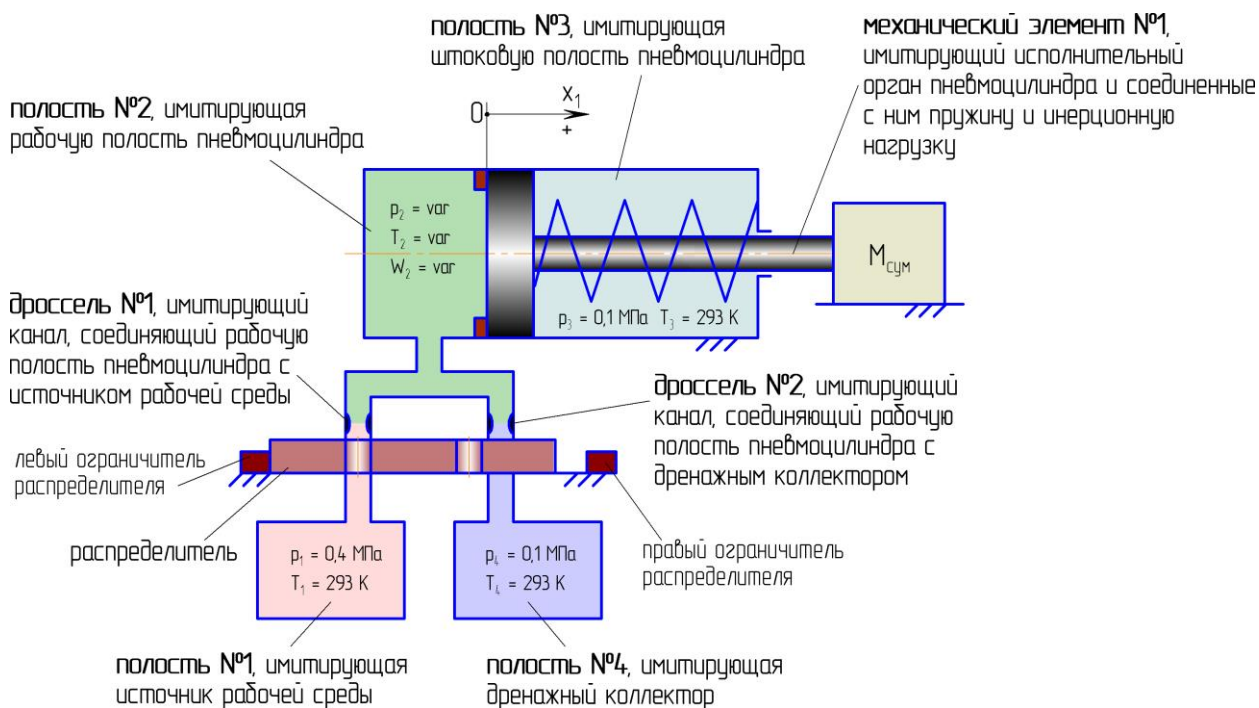


Рисунок Б.2 – Расчетная схема для моделирования работы пневматического привода

Формирование модели в SimInTech

Для моделирования отдельных объектов (указанных на рисунке Б.2) в SimInTech, в соответствии с принятыми допущениями и расчетной схемой, необходимо использовать блоки библиотеки «ГПС», указанные в таблице Б.2.

Таблица Б.2 – Моделируемые объекты и соответствующие блоки библиотеки «ГПС»

Моделируемый объект (рисунок Б.2)	Блок библиотеки «ГПС»
механический элемент №1	«Механический элемент поступательного движения»
дроссель №1	«Пневматический турбулентный дроссель с регулированием по произвольному параметру»
дроссель №2	«Пневматический турбулентный дроссель с регулированием по произвольному параметру»
полость №1	«Полость с постоянными параметрами газа»
полость №2	«Теплоизолированная полость переменного объема с итерационным характером расчета»

Моделируемый объект (рисунок Б.2)	Блок библиотеки «ГПС»
	или «Теплоизолированная полость переменного объема с прямым характером расчета»
полость №3	«Полость с постоянными параметрами газа»
полость №4	«Полость с постоянными параметрами газа»

Для осуществления связей между блоками, моделирующими отдельные объекты, используются блоки «Размножитель механический» и «Размножитель полостной».

Управление распределителем смоделировано с помощью стандартных блоков SimInTech типа «Ключ» и «Константа».

Механический элемент №1 (рисунок Б.2) также можно смоделировать с использованием блоков библиотеки «Механика» (рисунок Б.3). В этом случае для осуществления связей между блоками библиотек «ГПС» и «Механика» необходимо использовать блок «Переходник из Механики в ГПС», входящий в библиотеку «ГПС».

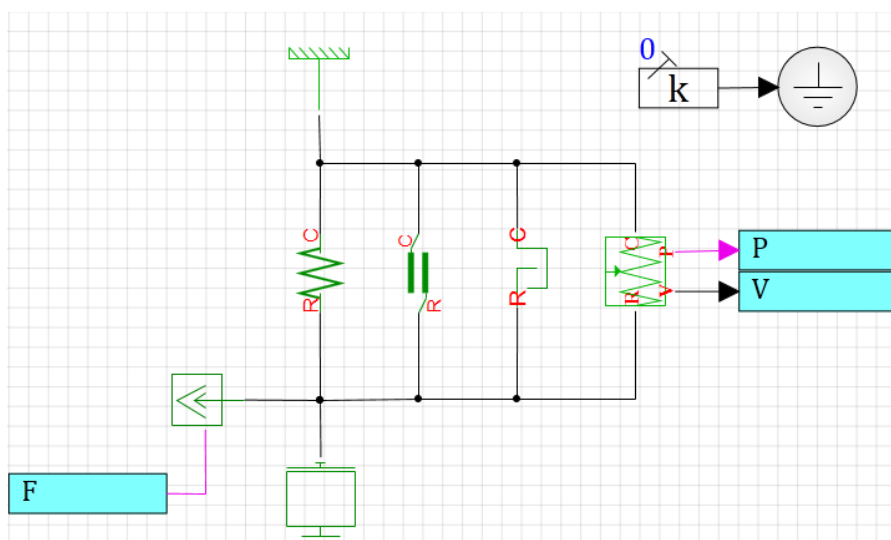


Рисунок Б.3 – Модель механического элемента №1, сформированная из блоков библиотеки «Механика»

Модель пневмопривода, сформированная в SimInTech из блоков библиотеки «ГПС», приведена на рисунке Б.4, а из блоков библиотек «ГПС» и «Механика» – на рисунке Б.5.

Для моделей установлены следующие параметры расчета:

- метод интегрирования: Адаптивный 1;
- минимальный шаг интегрирования: 10^{-7} ;
- максимальный шаг интегрирования: 10^{-3} ;
- конечное время расчета: $1 \cdot 10^5$;
- метод итерации петель: Ньютона-Рафсона;
- максимальное количество итераций: 100.

Значения свойств отдельных блоков модели приведены на рисунках Б.6-Б.13.

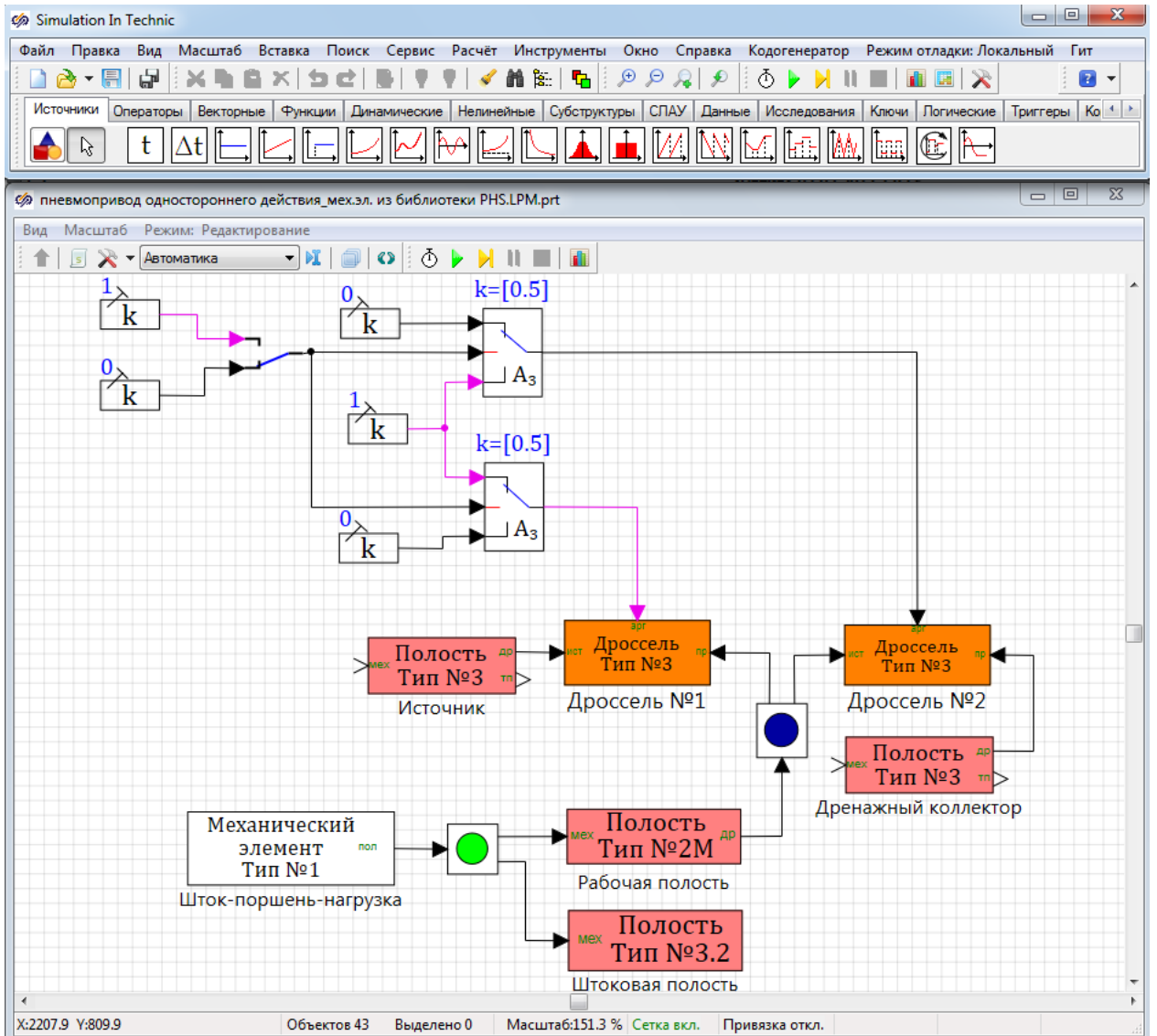


Рисунок Б.4 – Модель пневмопривода одностороннего действия, сформированная из блоков библиотеки «ГПС»

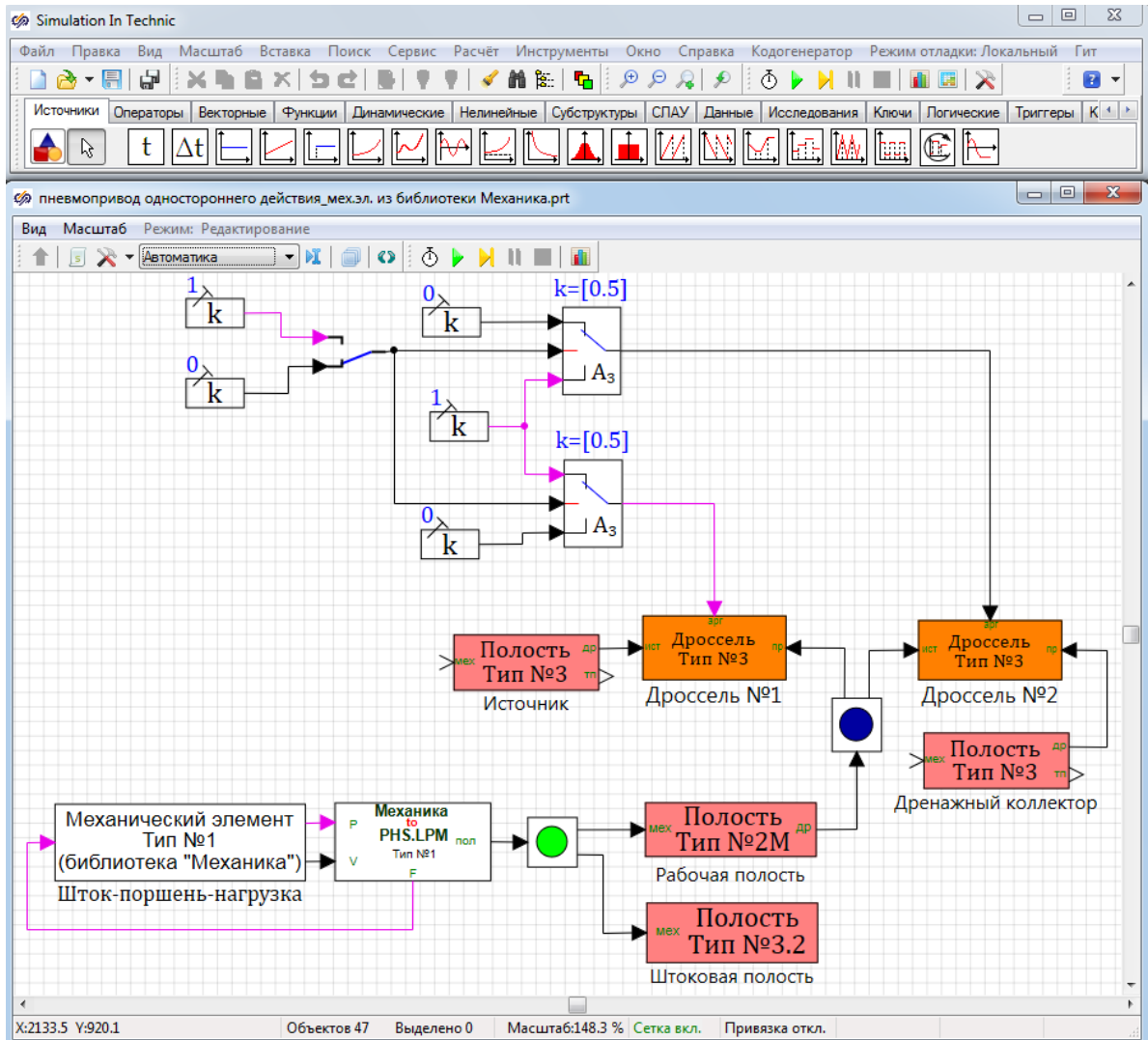


Рисунок Б.5 – Модель пневмопривода одностороннего действия, сформированная из блоков библиотек «ГПС» и «Механика»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	0.4e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	293
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок Б.6 – Свойства блока, обозначенного как «Источник»

Название	Имя	Значение
Количество полостей, связанных с рассматриваемым механическим элементом	N_pol	2
Масса механического элемента, кг	M_el	0.1
Усилие от позиционной нагрузки (от действия упругих элементов) при нулевом перемещении механического элемента, Н	Fupr_0	150
Эквивалентная жесткость упругих элементов, Н/м	c_upr	1160
Коэффициент вязкого трения, Н/(м/с)	Kv_tr	500
Начальное перемещение механического элемента, м	X_0	0.3
Начальная скорость механического элемента, м/с	V_0	0
Минимально возможное перемещение механического элемента, м	X_min	0
Максимально возможное перемещение механического элемента, м	X_max	0.3
Вектор значений площадей механического элемента, на которые действуют давления в связанных полостях, м ²	S_p	[19.635e-4; 19.635e-4]
Сила сухого трения движения, Н	Ftr_dvizh	100
Сила сухого трения страгивания, Н	Ftr_str	100

Рисунок Б.7 – Свойства блока, обозначенного как «Шток-поршень-нагрузка»

Название	Имя	Значение
Начальное абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_0	0.4e6
Начальная термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_0	293
Объем полости при нулевых перемещениях связанных с ней механических элементов, м ³	W_x_0	0.00005
Вектор начальных перемещений связанных механических элементов, м	X_0	[0;3]
Количество дросселей (каналов), связанных с полостью	N_dr	2
Количество механических элементов, связанных с рассматриваемой полостью	N_meh	1
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления объемной связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_W	[19.635e-4]
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления силовой связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_p	[19.635e-4]
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок Б.8 – Свойства блока, обозначенного как «Рабочая полость»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	0.1e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	293
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок Б.9 – Свойства блока, обозначенного как «Штоковая полость»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	0.1e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	293
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок Б.10 – Свойства блока, обозначенного как «Дренажный коллектор»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_prjam	1
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	1
Вектор значений аргумента (x, м или t, сек или p, Па или др.) функции площади проходного сечения дросселя	argument	[0;1e-10;100]
Вектор значений площади проходного сечения дросселя, м ²	func	[0;pi*(4e-3)^2/4;pi*(4e-3)^2/4]
Рабочая среда	gas_type	воздух по Редлиху-Квонгу

Рисунок Б.11 – Свойства блока, обозначенного как «Дроссель №1»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_prjam	1
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	1
Вектор значений аргумента (x, м или t, сек или p, Па или др.) функции площади проходного сечения дросселя	argument	[0;1e-10;100]
Вектор значений площади проходного сечения дросселя, м ²	func	[0;pi*(8e-3)^2/4;pi*(8e-3)^2/4]
Рабочая среда	gas_type	воздух по Редлиху-Квонгу

Рисунок Б.12 – Свойства блока, обозначенного как «Дроссель №2»

Название	Имя	Значение
Количество полостей, связанных с механическим элементом	N_pol	2
Вектор значений площадей механического элемента, на которые действуют давления в связанных полостях, м ²	S_p	[19.635e-4;19.635e-4]

Рисунок Б.13 – Свойства блока «Переходник из Механики в ГПС»

Результаты моделирования в SimInTech

Результаты моделирования процессов в пневмоприводе при смене позиций распределителя приведены на рисунках Б.14, Б.15.

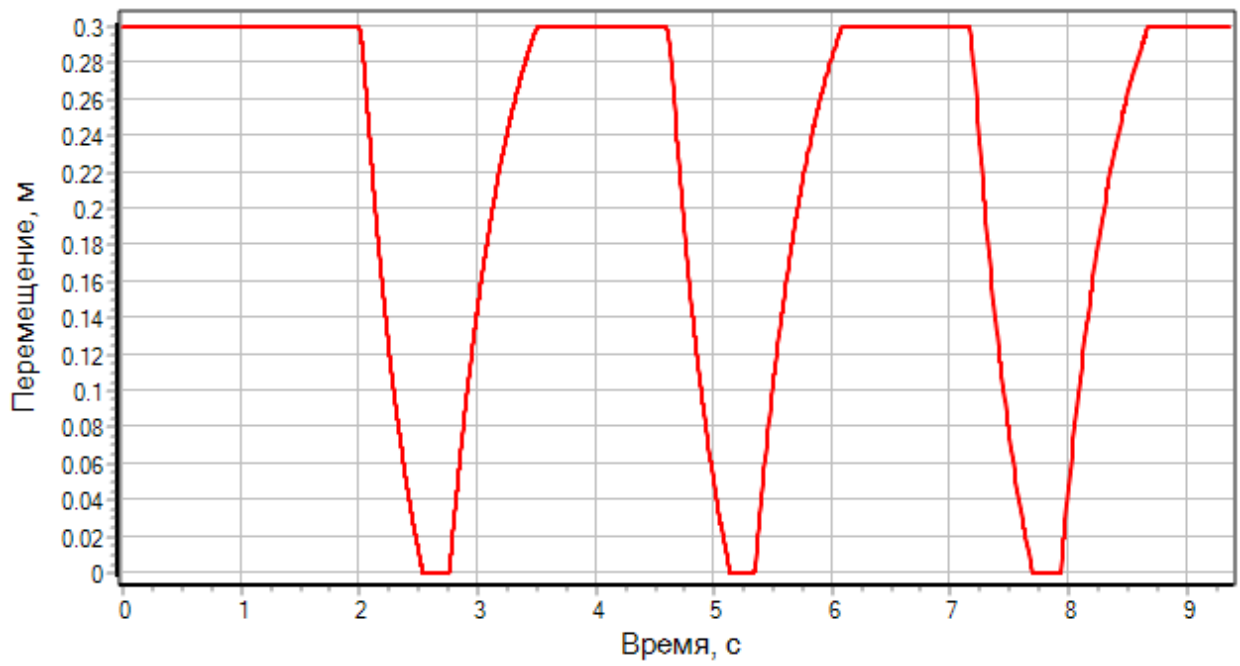


Рисунок Б.14 – Переходный процесс по перемещению
исполнительного органа

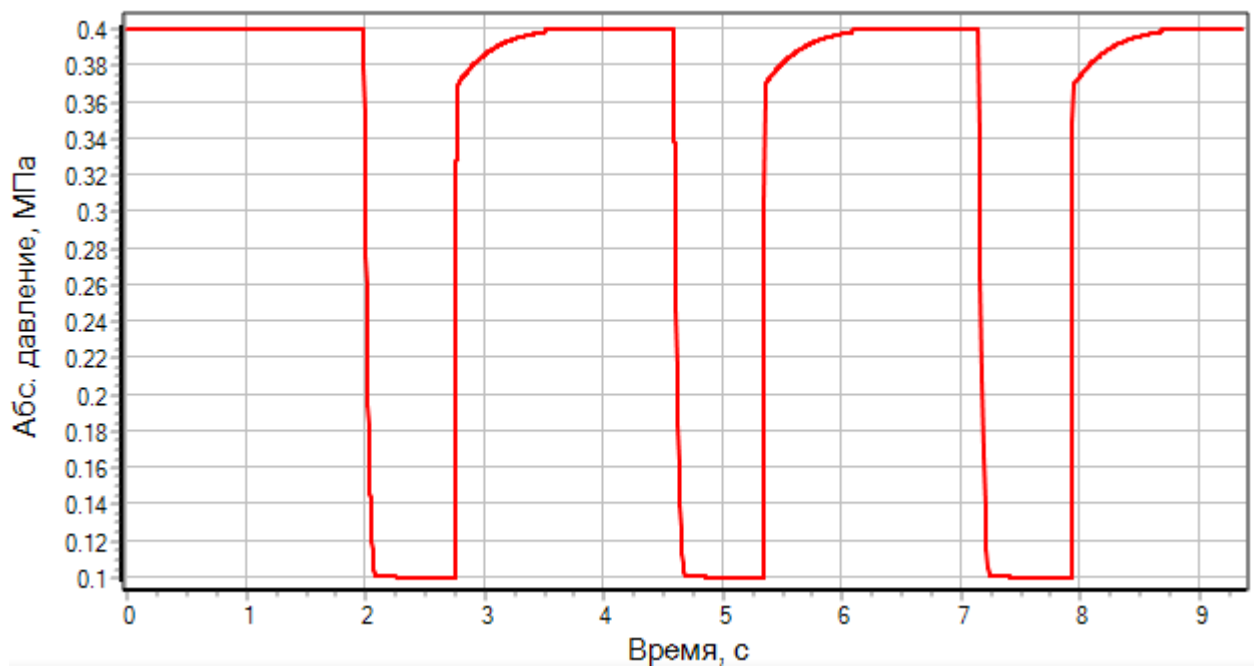


Рисунок Б.15 – Переходный процесс по абсолютному давлению
рабочей среды в рабочей полости пневмоцилиндра

Приложение В

Пример №3. Моделирование работы однопоршневого компрессора

Описание задачи

Рассматривается закачка атмосферного воздуха в теплоизолированную полость постоянного объема через однопоршневой компрессор (рисунок В.1). Считается, что компрессор снабжен теплообменным аппаратом, обеспечивающим постоянную температуру воздуха в рабочей полости компрессора.

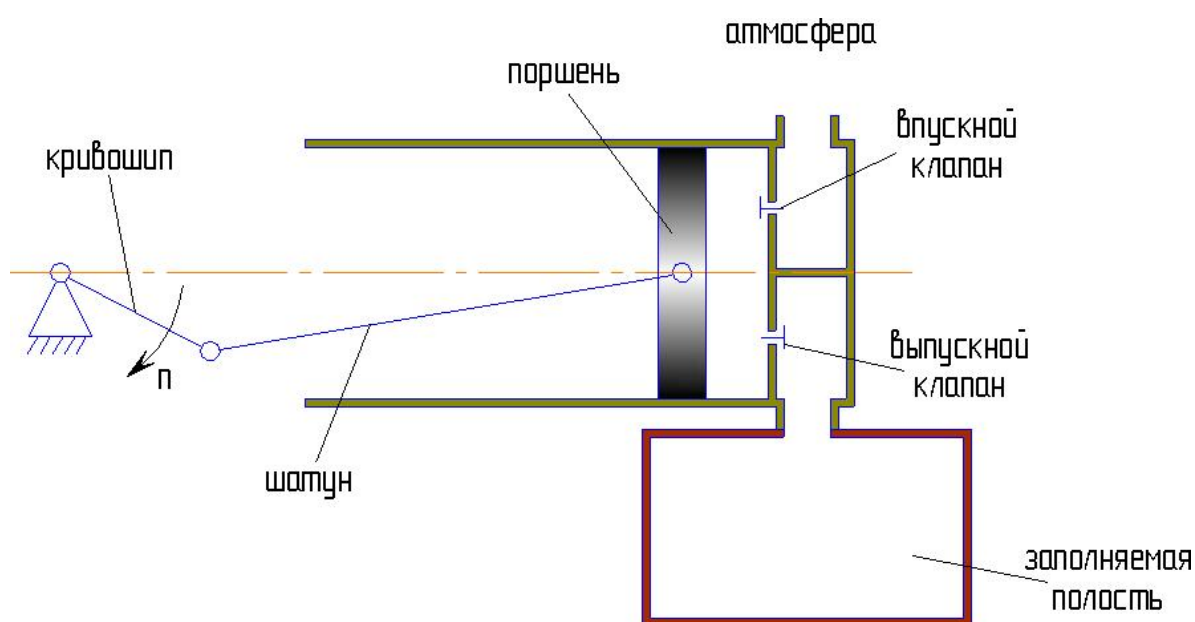


Рисунок В.1 – Принципиальная схема

Задача: Требуется смоделировать процесс закачки воздуха и рассчитать переходные процессы:

- по перемещению поршня компрессора;
- по абсолютному давлению рабочей среды в заполняемой полости;
- по абсолютному давлению рабочей среды в полости компрессора.

Исходные данные:

Исходные данные приведены в таблице В.1.

Таблица В.1 – Исходные данные для моделирования

Параметр	Единицы	Значение
Рабочая среда	–	воздух
Абсолютное давление атмосферного воздуха	МПа	0,1
Температура атмосферного воздуха	К	293
Частота вращения кривошипа	об/мин	120
Длина кривошипа	м	0,2
Длина шатуна	м	0,6
Начальное абсолютное давление рабочей среды в полости компрессора	МПа	0,1
Начальная температура рабочей среды в полости компрессора	К	293
Объем рабочей полости компрессора	м ³	0,012566
Площадь торцевой поверхности поршня	м ²	0,031416
Масса впускного клапана и связанных с ним деталей	кг	0,005
Усилие, передаваемое на впускной клапан пружиной, при нулевом перемещении первого	Н	0,01
Жесткость пружины впускного клапана	Н/м	5
Максимальное перемещение впускного клапана	м	$0,1 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент расхода затвора впускного клапана	–	0,82
Критическое значение перемещения впускного клапана	м	$1,25 \cdot 10^{-3}$
Диаметр отверстия в седле впускного клапана	м	$50 \cdot 10^{-3}$
Площадь поверхности впускного клапана, на которую действует давление в рабочей полости компрессора	м ²	$1,9635 \cdot 10^{-3}$
Площадь поверхности впускного клапана, на которую действует давление атмосферного воздуха	м ²	$1,9635 \cdot 10^{-3}$
Масса выпускного клапана и связанных с ним деталей	кг	0,005
Усилие, передаваемое на выпускной клапан пружиной, при нулевом перемещении первого	Н	0,01
Жесткость пружины выпускного клапана	Н/м	5
Максимальное перемещение выпускного клапана	м	$0,1 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент расхода затвора выпускного клапана	–	0,82
Критическое значение перемещения выпускного клапана	м	$1,25 \cdot 10^{-3}$
Диаметр отверстия в седле выпускного клапана	м	$50 \cdot 10^{-3}$
Площадь поверхности выпускного клапана, на которую действует давление в рабочей полости компрессора	м ²	$1,9635 \cdot 10^{-3}$
Площадь поверхности выпускного клапана, на которую действует давление в заполняемой полости	м ²	$1,9635 \cdot 10^{-3}$
Начальное абсолютное давление рабочей среды в заполняемой полости	МПа	0,1
Начальная температура рабочей среды в полости	К	293
Объем заполняемой полости	м ³	$2 \cdot 10^{-3}$
Температура рабочей среды в полости компрессора, которую должен обеспечивать теплообменный аппарат	К	293

Принятые допущения и расчетная схема

Примем следующие допущения:

- пренебрегаем влиянием работы, совершаемой клапанами над рабочей средой, и работы, совершаемой рабочей средой над клапанами, на параметры рабочей среды в соответствующих полостях;
- пренебрегаем утечками и перетечками рабочей среды в компрессоре;
- принимаем, что приводной двигатель (на рисунке В.1 отсутствует) обеспечивает требуемую частоту вращения кривошипа при любой нагрузке на поршне компрессора;
- пренебрегаем гидравлическим сопротивлением участка от входа в компрессор до входа в затвор впускного клапана, а также участка от затвора выпускного клапана до выхода из компрессора.

С учетом принятых допущений разобьем моделируемую систему (атмосфера-компрессор-заполняемая полость) на связанные подсистемы различной физической природы:

- **механическая подсистема:**
 - **механический элемент №1**, имитирующий кривошипно-ползунный механизм (кривошип-шатун-поршень) компрессора;
 - **механический элемент №2**, имитирующий впускной клапан компрессора и связанные с ним детали;
 - **механический элемент №3**, имитирующий выпускной клапан компрессора и связанные с ним детали.
- **гидродинамическая подсистема:**
 - **дроссель №1**, имитирующий затвор впускного клапана;
 - **дроссель №2**, имитирующий затвор выпускного клапана.
- **термодинамическая подсистема:**
 - **полость №1**, имитирующая атмосферу, как источник воздуха;
 - **полость №2**, имитирующая полость компрессора;
 - **полость №3**, имитирующая заполняемую полость.

Расчетная схема для моделирования работы компрессора по заполнению полости атмосферным воздухом приведена на рисунке В.2.

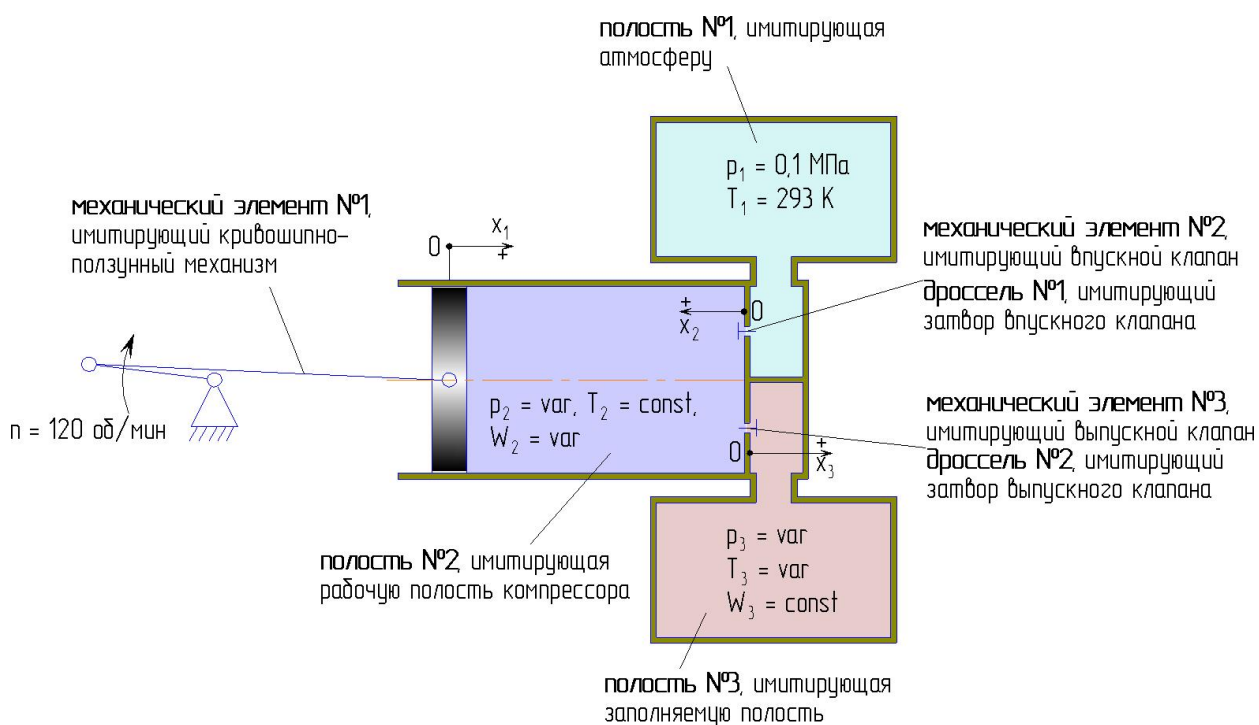


Рисунок В.2 – Расчетная схема для моделирования работы компрессора по заполнению полости атмосферным воздухом

Формирование модели в SimInTech

Для моделирования отдельных объектов (указанных на рисунке В.2) в SimInTech, в соответствии с принятыми допущениями и расчетной схемой, необходимо использовать блоки библиотеки «ГПС», указанные в таблице В.2.

Таблица В.2 – Моделируемые объекты и соответствующие блоки библиотеки «ГПС»

Моделируемый объект (рисунок В.2)	Блок библиотеки «ГПС»
механический элемент №1	«Кривошипно-ползунный механизм с постоянной скоростью вращения кривошипа»
механический элемент №2	«Механический элемент поступательного движения»
механический элемент №3	«Механический элемент поступательного движения»

Моделируемый объект (рисунок В.2)	Блок библиотеки «ГПС»
дроссель №1	«Пневматический турбулентный дроссель с пропорциональным регулированием и насыщением»
дроссель №2	«Пневматический турбулентный дроссель с пропорциональным регулированием и насыщением»
полость №1	«Полость с постоянными параметрами газа»
полость №2	«Теплоизолированная полость переменного объема с итерационным характером расчета» или «Теплоизолированная полость переменного объема с прямым характером расчета»
полость №3	

Для осуществления связей между блоками, моделирующими отдельные объекты, используются блоки «Размножитель механический», «Концентратор механический» и «Размножитель полостной».

Для моделирования теплообменного аппарата, обеспечивающего постоянную температуру воздуха в рабочей полости компрессора, используется блок «Регулятор температуры среды в полости».

Модель компрессора, заполняющего полость атмосферным воздухом, сформированная в SimInTech из блоков библиотеки «ГПС», приведена на рисунке В.3.

Для модели установлены следующие параметры расчета:

- метод интегрирования: Адаптивный 1;
- минимальный шаг интегрирования: 10^{-8} ;
- максимальный шаг интегрирования: 10^{-3} ;
- конечное время расчета: 2 с;
- метод итерации петель: Ньютона-Рафсона;
- максимальное количество итераций: 100.

Значения свойств отдельных блоков модели приведены на рисунках В.4-В.12.

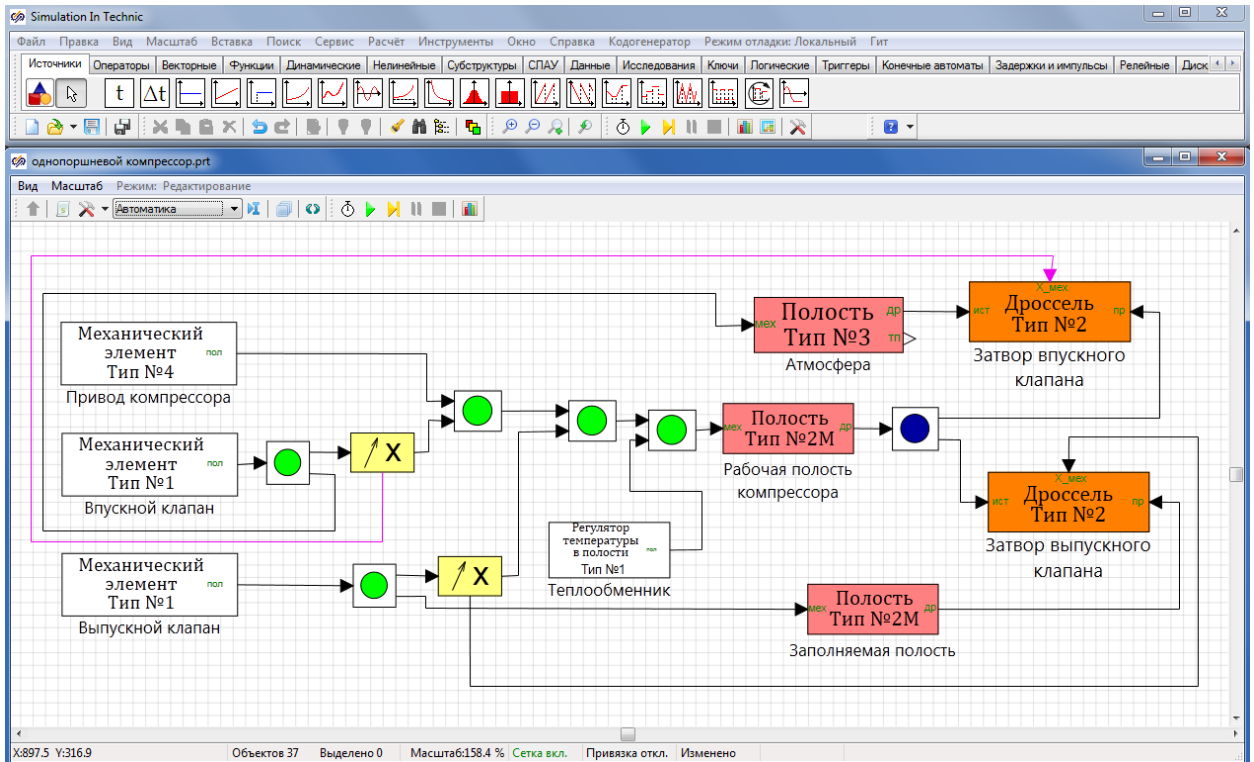


Рисунок В.3 – Модель компрессора, заполняющего полость атмосферным воздухом, сформированная из блоков библиотеки «ГПС»

Название	Имя	Значение
Частота вращения кривошипа, об/с	n_ksh	120/60
Длина кривошипа, м	L_ksh	0.2
Длина шатуна, м	L_sh	0.6

Рисунок В.4 – Свойства блока, обозначенного как «Привод компрессора»

Название	Имя	Значение
Количество полостей, связанных с рассматриваемым механическим элементом	N_pol	2
Масса механического элемента, кг	M_el	0.005
Усилие от позиционной нагрузки (от действия упругих элементов) при нулевом перемещении механического элемента, Н	Fupr_0	0.01
Эквивалентная жесткость упругих элементов, Н/м	c_upr	5
Коэффициент вязкого трения, Н/(м/с)	Kv_tr	0
Начальное перемещение механического элемента, м	X_0	0
Начальная скорость механического элемента, м/с	V_0	0
Минимально возможное перемещение механического элемента, м	X_min	0
Максимально возможное перемещение механического элемента, м	X_max	0.1e-3
Вектор значений площадей механического элемента, на которые действуют давления в связанных полостях, м ²	S_p	[-1.9635e-3; 1.9635e-3]
Сила сухого трения движения, Н	Ftr_dvizh	0
Сила сухого трения страгивания, Н	Ftr_str	0

Рисунок В.5 – Свойства блока, обозначенного как «Впускной клапан»

Название	Имя	Значение
Количество полостей, связанных с рассматриваемым механическим элементом	N_pol	2
Масса механического элемента, кг	M_el	0.005
Усилие от позиционной нагрузки (от действия упругих элементов) при нулевом перемещении механического элемента, Н	Fupr_0	0.01
Эквивалентная жесткость упругих элементов, Н/м	c_upr	5
Коэффициент вязкого трения, Н/(м/с)	Kv_tr	0
Начальное перемещение механического элемента, м	X_0	0.1e-3
Начальная скорость механического элемента, м/с	V_0	0
Минимально возможное перемещение механического элемента, м	X_min	0
Максимально возможное перемещение механического элемента, м	X_max	0.1e-3
Вектор значений площадей механического элемента, на которые действуют давления в связанных полостях, м ²	S_p	[1.9635e-3,-1.9635e-3]
Сила сухого трения движения, Н	Ftr_dvizh	0
Сила сухого трения страгивания, Н	Ftr_str	0

Рисунок В.6 – Свойства блока, обозначенного как «Выпускной клапан»

Название	Имя	Значение
Температура, поддерживаемая в полости, К	T_treb	293
Коэффициент усиления регулятора	K_us_p	10

Рисунок В.7 – Свойства блока, обозначенного как «Теплообменник»

Название	Имя	Значение
Начальное абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_0	0.1e6
Начальная термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_0	293
Объем полости при нулевых перемещениях связанных с ней механических элементов, м ³	W_x_0	0.012566*1e-5
Вектор начальных перемещений связанных механических элементов, м	X_0	[0]
Количество дросселей (каналов), связанных с полостью	N_dr	2
Количество механических элементов, связанных с рассматриваемой полостью	N_meh	4
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления объемной связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_W	[-0.031416,0,0,1]
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления силовой связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_p	[-0.031416,0,0,1]
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок В.8 – Свойства блока, обозначенного как «Рабочая полость компрессора»

Название	Имя	Значение
Начальное абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_0	0.1e6
Начальная термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_0	293
Объем полости при нулевых перемещениях связанных с ней механических элементов, м ³	W_x_0	0.002
Вектор начальных перемещений связанных механических элементов, м	X_0	[0]
Количество дросселей (каналов), связанных с полостью	N_dr	1
Количество механических элементов, связанных с рассматриваемой полостью	N_meh	1
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления объемной связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_W	[0]
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления силовой связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_p	[0]
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок В.9 – Свойства блока, обозначенного как «Заполняемая полость»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	0.1e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	293
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок В.10 – Свойства блока, обозначенного как «Атмосфера»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_pria	0.82
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	0.82
Определяющий диаметр дросселя, м	d_x	50e-3
Критическое значение перемещения регулирующего элемента, м	X_kr	1.25e-3
Положение регулирующего элемента относительно закрытого состояния дросселя при нулевом перемещении связанного механического элемента, м	X_nach	0
Рабочая среда	gas_type	воздух по Редлиху-Квонгу

Рисунок В.11 – Свойства блока, обозначенного как «Затвор впускного клапана»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_pija	0.82
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	0.82
Определяющий диаметр дросселя, м	d_x	50e-3
Критическое значение перемещения регулирующего элемента, м	X_kr	1.25e-3
Положение регулирующего элемента относительно закрытого состояния дросселя при нулевом перемещении связанного механического элемента, м	X_nach	0
Рабочая среда	gas_type	воздух по Редлиху-Квонгу

Рисунок В.12 – Свойства блока, обозначенного как
«Затвор выпускного клапана»

Результаты моделирования в SimInTech

Результаты моделирования заполнения полости атмосферным воздухом через компрессор приведены на рисунках В.13-В.15.

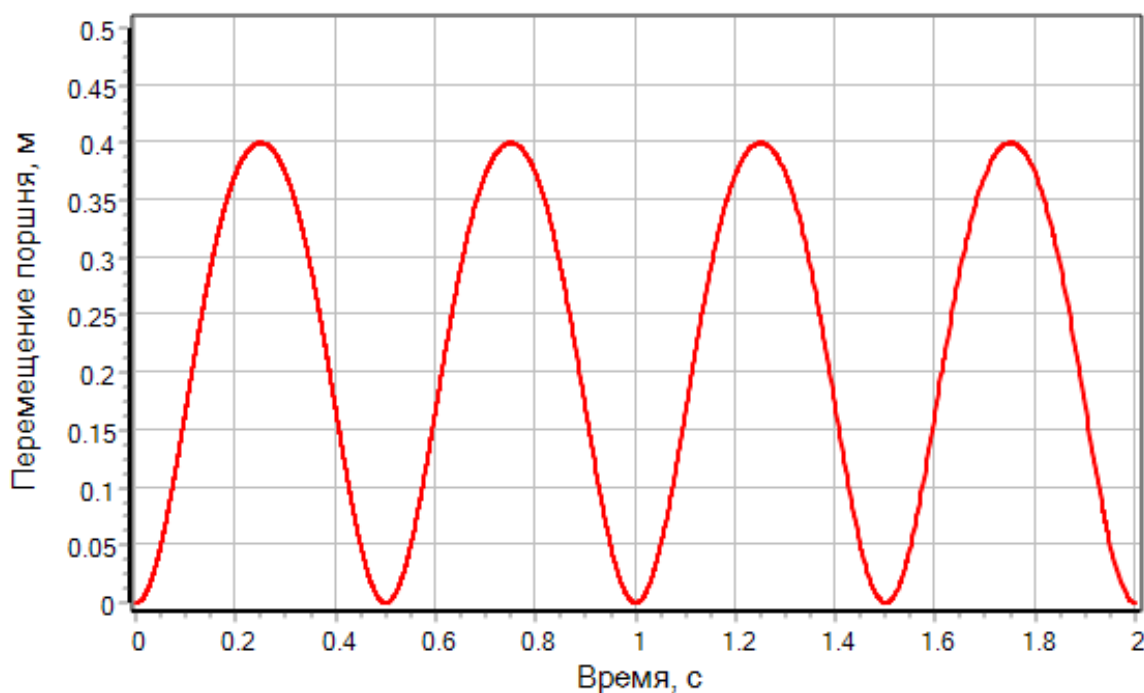


Рисунок В.13 – Переходный процесс по перемещению поршня компрессора

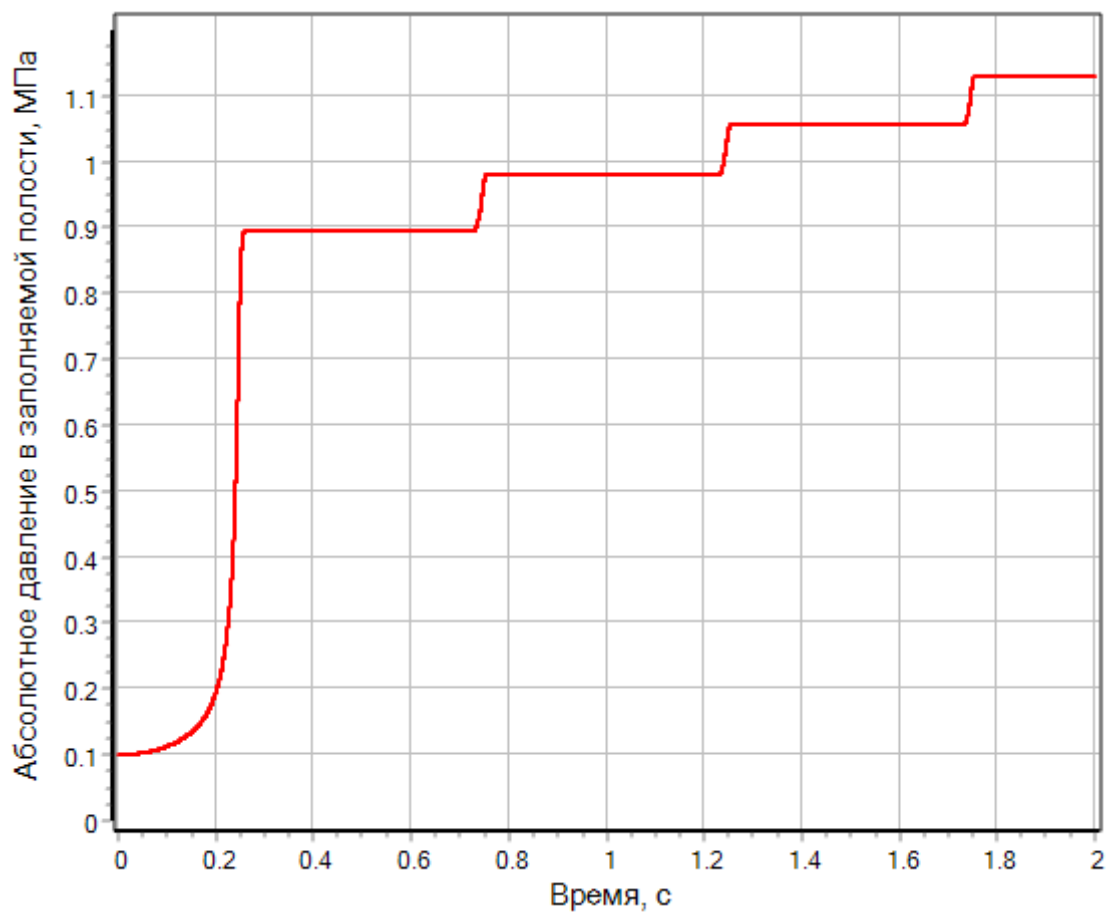


Рисунок В.14 – Переходный процесс по абсолютному давлению рабочей среды в заполняемой полости

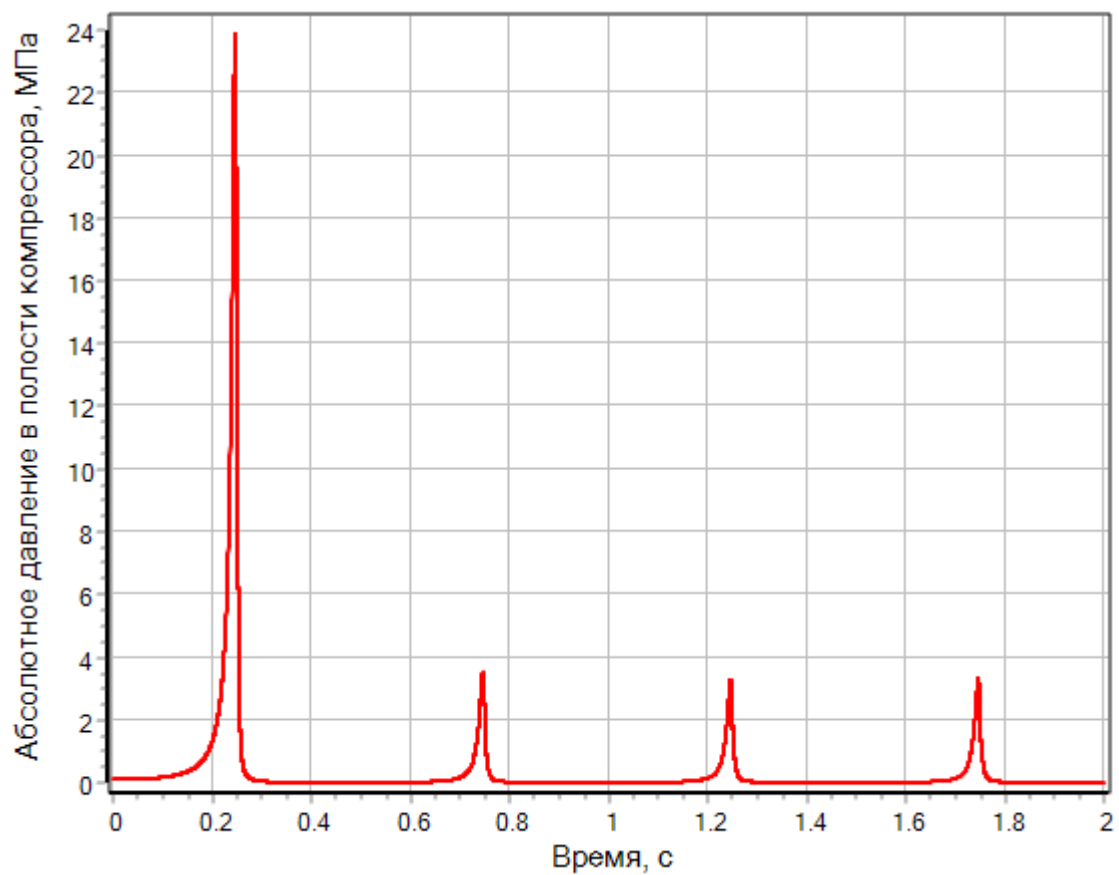


Рисунок В.15 – Переходный процесс по абсолютному давлению рабочей среды в полости компрессора

Приложение Г

Пример №4. Моделирование работы системы выдавливания воды

Описание задачи

Рассматривается система выдавливания воды (рисунок Г.1), состоящая из цилиндрического бака, частично заполненного водой, цилиндрического насадка и воздушной подушки, которая создается над поверхностью воды. Подпитка воздушной подушки производится через дроссель от источника сжатого воздуха. Выброс воды происходит в атмосферу.

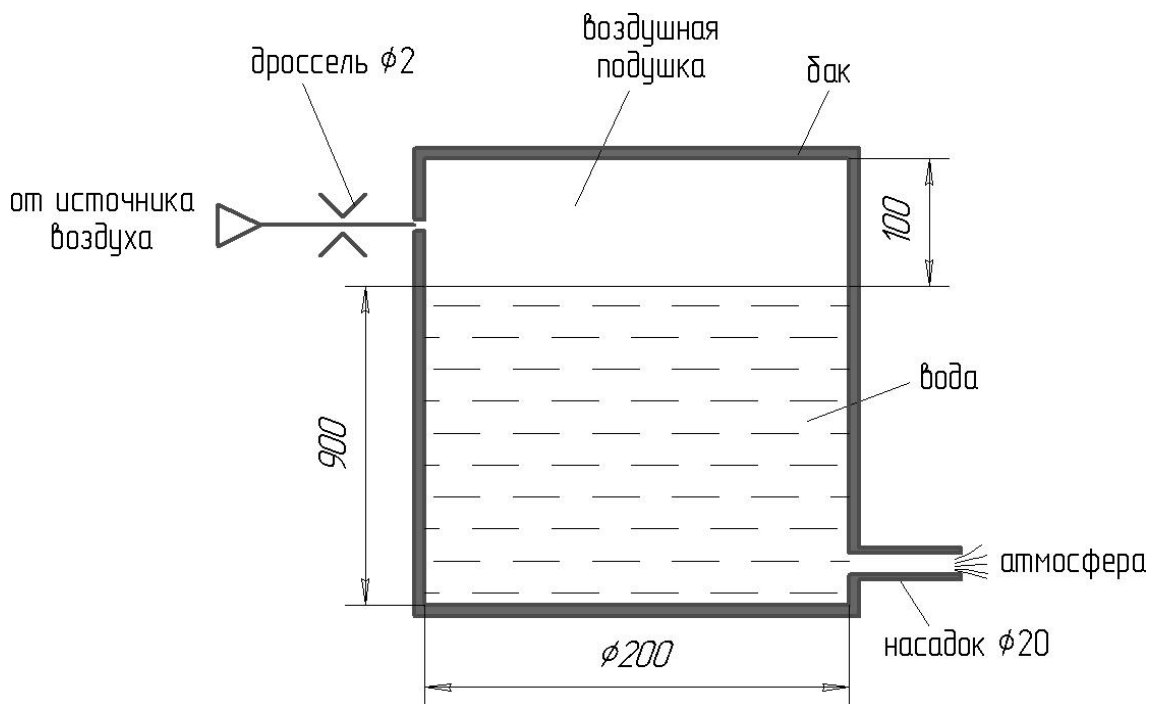


Рисунок Г.1 – Принципиальная схема системы выдавливания воды

Задача: Требуется смоделировать процесс выдавливания воды из бака и рассчитать переходные процессы:

- по изменению уровня воды в баке;
- по давлению воздуха в подушке;
- по массовому расходу воздуха через дроссель;
- по массовому расходу воды через насадок.

Исходные данные:

Исходные данные приведены в таблице Г.1.

Таблица Г.1 – Исходные данные для моделирования

Параметр	Единицы	Значение
Абсолютное давление воздуха в источнике	МПа	20,1
Температура воздуха в источнике	К	293
Высота бака	м	1
Диаметр бака	м	0,2
Начальный уровень воды в баке	м	0,9
Диаметр дросселя	м	0,002
Диаметр насадка	м	0,010
Атмосферное давление	МПа	0,1
Начальное абсолютное давление воздуха в подушке	МПа	0,1
Начальная температура воздуха в подушке	К	293
Начальная температура воды в баке	К	293

Принятые допущения и расчетная схема

Примем следующие допущения:

- границу раздела воздуха и воды в баке моделируем условным невесомым поршнем;
- пренебрегаем процессами теплообмена между воздухом, водой и стенками бака;
- пренебрегаем гидростатическим давлением столба воды в баке и считаем давление и температуру воды одинаковыми по всему объему.

С учетом принятых допущений разобьем моделируемую систему на связанные подсистемы различной физической природы:

- **механическая подсистема:**
 - **механический элемент №1** – условный невесомый поршень, имитирующий границу раздела воздуха и воды в баке.
- **гидродинамическая подсистема:**
 - **дроссель №1**, имитирующий дроссель, соединяющий источник воздуха и подушку в баке;
 - **дроссель №2**, имитирующий насадок, соединяющий бак с атмосферой.
- **термодинамическая подсистема:**
 - **полость №1**, имитирующая источник воздуха;

- полость №2, имитирующая воздушную подушку;
- полость №3, имитирующая воду в баке;
- полость №4, имитирующая атмосферу.

Расчетная схема для моделирования работы системы выдавливания воды приведена на рисунке Г.2.

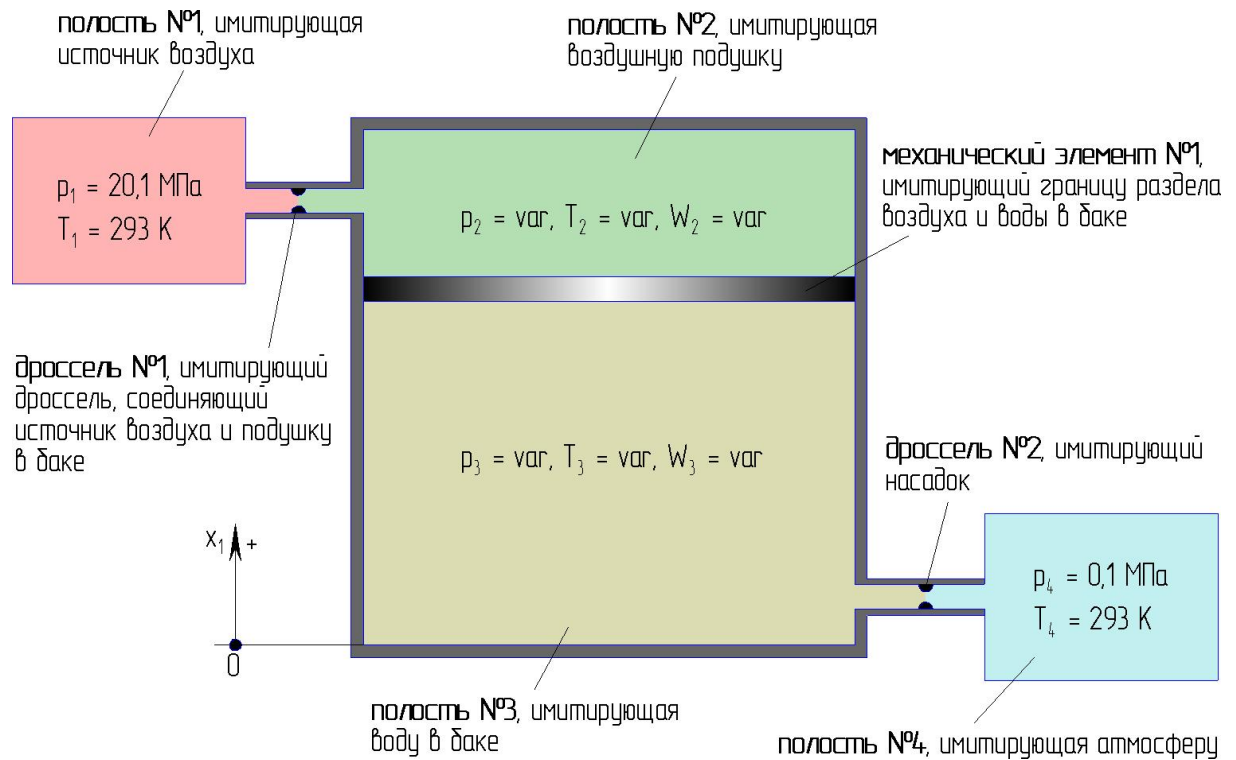


Рисунок Г.2 – Расчетная схема для моделирования работы системы выдавливания воды

Формирование модели в SimInTech

Для моделирования отдельных объектов (указанных на рисунке Г.2) в SimInTech, в соответствии с принятыми допущениями и расчетной схемой, необходимо использовать блоки библиотеки «ГПС», указанные в таблице Г.2.

Таблица Г.2 – Моделируемые объекты и соответствующие блоки библиотеки «ГПС»

Моделируемый объект (рисунок Г.2)	Блок библиотеки «ГПС»
механический элемент №1	«Механический элемент поступательного движения»

Моделируемый объект (рисунок Г.2)	Блок библиотеки «ГПС»
дроссель №1	«Пневматический турбулентный дроссель постоянного сечения»
дроссель №2	«Гидравлический турбулентный дроссель постоянного сечения»
полость №1	«Полость с постоянными параметрами газа»
полость №2	«Теплоизолированная полость переменного объема с итерационным характером расчета» или «Теплоизолированная полость переменного объема с прямым характером расчета»
полость №3	«Теплоизолированная полость переменного объема с итерационным характером расчета»
полость №4	«Полость с постоянными параметрами газа»

Для осуществления связей между блоками, моделирующими отдельные объекты, используется блок «Размножитель механический».

Для модели установлены следующие параметры расчета:

- метод интегрирования: Адаптивный 5;
- минимальный шаг интегрирования: 10^{-8} ;
- максимальный шаг интегрирования: 10^{-2} ;
- конечное время расчета: 4,5 с;
- метод итерации петель: Ньютона-Рафсона;
- максимальное количество итераций: 1000;
- абсолютная ошибка: 10^{-5} .

Модель системы, сформированная в SimInTech из блоков библиотеки «ГПС», приведена на рисунке Г.3.

Значения свойств отдельных блоков модели приведены на рисунках Г.4-Г.10.

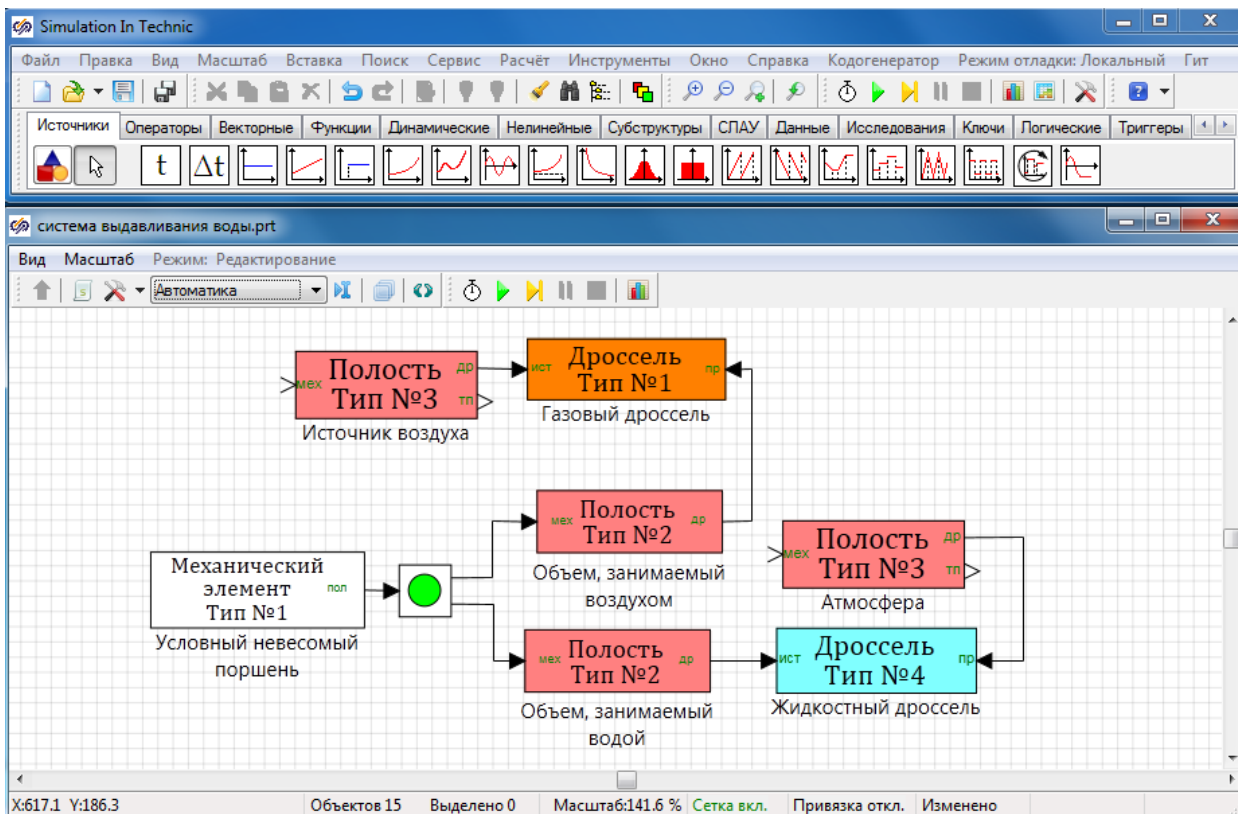


Рисунок Г.3 – Модель системы выдавливания воды, сформированная из блоков библиотеки «ГПС»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	20.1e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	293
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок Г.4 – Свойства блока, обозначенного как «Источник воздуха»

Название	Имя	Значение
Начальное абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_0	0.1e6
Начальная термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_0	293
Объем полости при нулевых перемещениях связанных с ней механических элементов, м ³	W_x_0	0.031385
Вектор начальных перемещений связанных механических элементов, м	X_0	[0.9]
Количество дросселей (каналов), связанных с полостью	N_dr	1
Количество механических элементов, связанных с рассматриваемой полостью	N_meh	1
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления объемной связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_W	[-0.03142]
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления силовой связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_p	[-0.03142]
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок Г.5 – Свойства блока, обозначенного как «Объем, занимаемый воздухом»

Название	Имя	Значение
Начальное абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_0	0.1e6
Начальная термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_0	293
Объем полости при нулевых перемещениях связанных с ней механических элементов, м ³	W_x_0	3.141593e-5
Вектор начальных перемещений связанных механических элементов, м	X_0	[0.9]
Количество дросселей (каналов), связанных с полостью	N_dr	1
Количество механических элементов, связанных с рассматриваемой полостью	N_meh	1
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления объемной связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_W	[0.03142]
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления силовой связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_p	[0.03142]
Рабочая среда	fluid_type	вода по ГСССД Р-776-98

Рисунок Г.6 – Свойства блока, обозначенного как «Объем, занимаемый водой»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	0.1e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	293
Рабочая среда	fluid_type	вода по ГОСТ Р-776-98

Рисунок Г.7 – Свойства блока, обозначенного как «Атмосфера»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_prjam	0.9
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	0.9
Диаметр дросселя при прямом токе рабочей среды, м	d_dr_prjam	2e-3
Диаметр дросселя при обратном токе рабочей среды, м	d_dr_obr	2e-3
Рабочая среда	gas_type	воздух по Редлиху-Квонгу

Рисунок Г.8 – Свойства блока, обозначенного как «Газовый дроссель»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_prjam	0.82
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	0.82
Диаметр дросселя при прямом токе рабочей среды, м	d_dr_prjam	10e-3
Диаметр дросселя при обратном токе рабочей среды, м	d_dr_obr	10e-3
Рабочая среда	liquid_type	вода по ГОСТ Р-776-98

Рисунок Г.9 – Свойства блока, обозначенного как «Жидкостный дроссель»

Название	Имя	Значение
Количество полостей, связанных с рассматриваемым механическим элементом	N_pol	2
Масса механического элемента, кг	M_el	0.01
Усилие от позиционной нагрузки (от действия упругих элементов) при нулевом перемещении механического элемента, Н	Fupr_0	0
Эквивалентная жесткость упругих элементов, Н/м	c_upr	0
Коэффициент вязкого трения, Н/(м/с)	Kv_tr	0
Начальное перемещение механического элемента, м	X_0	0.9
Начальная скорость механического элемента, м/с	V_0	0
Минимально возможное перемещение механического элемента, м	X_min	0.001
Максимально возможное перемещение механического элемента, м	X_max	0.999
Вектор значений площадей механического элемента, на которые действуют давления в связанных полостях, м ²	S_p	[-0.03142,0.03142]
Сила сухого трения движения, Н	Ftr_dvizh	0
Сила сухого трения страгивания, Н	Ftr_str	0

Рисунок Г.10 – Свойства блока, обозначенного как
«Условный невесомый поршень»

Результаты моделирования в SimInTech

Результаты моделирования процессов в системе выдавливания воды приведены на рисунках Г.11-Г.14.

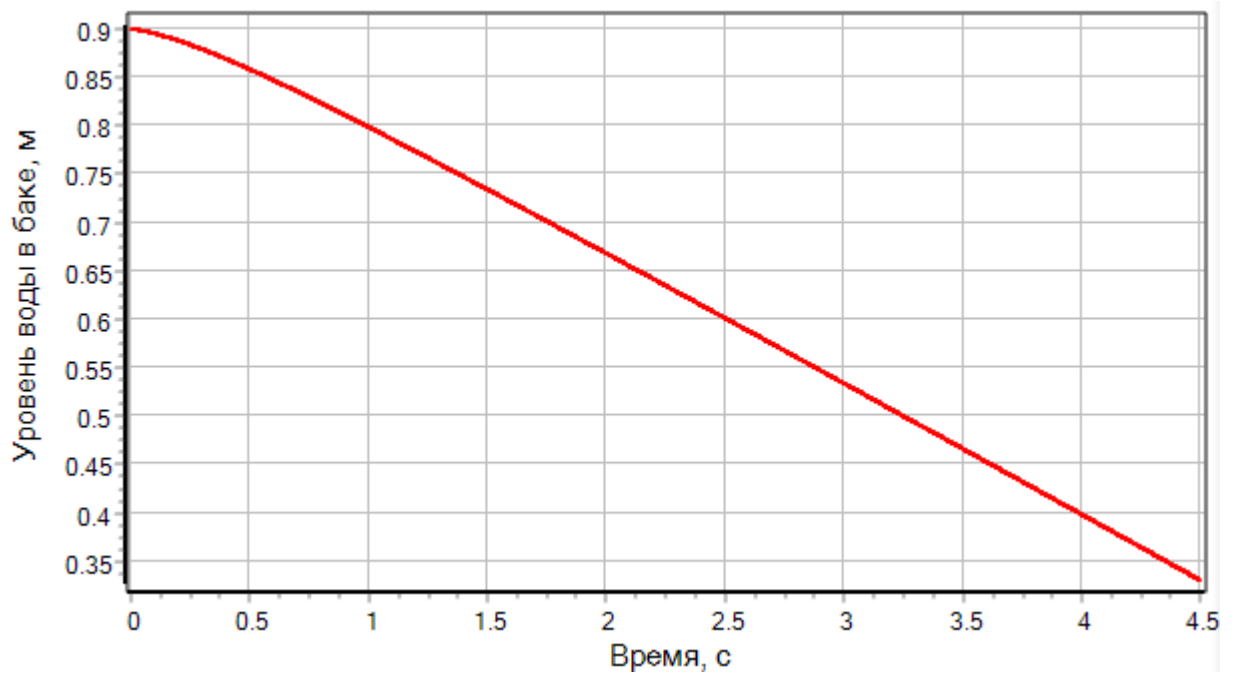


Рисунок Г.11 – Переходный процесс по изменению уровня воды в баке

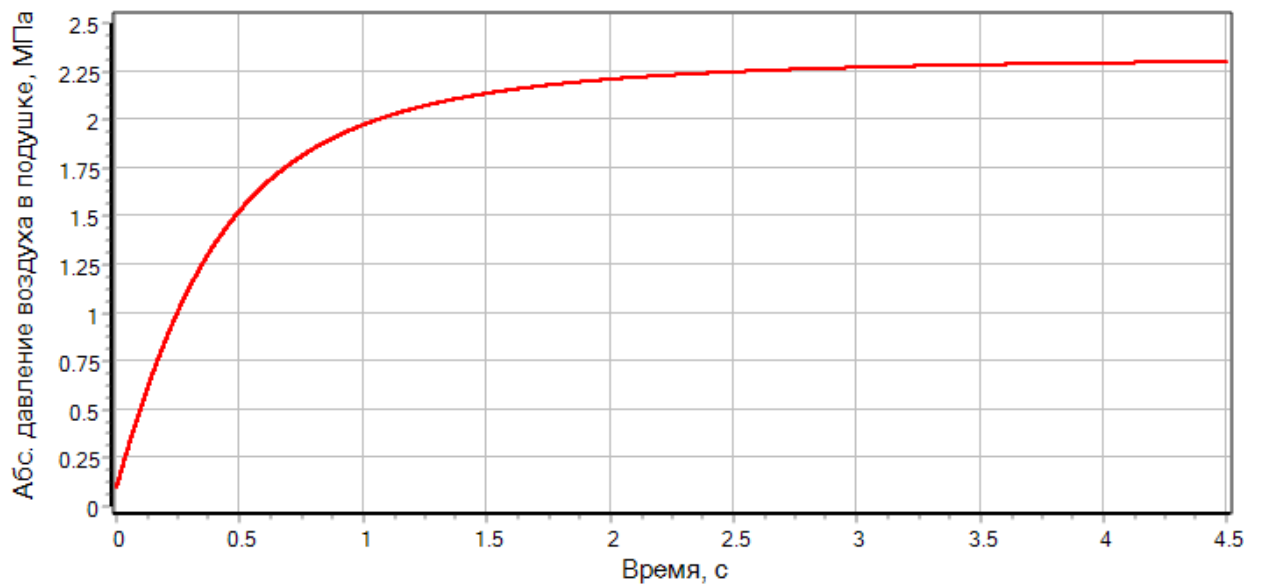


Рисунок Г.12 – Переходный процесс по абсолютному давлению воздуха в подушке

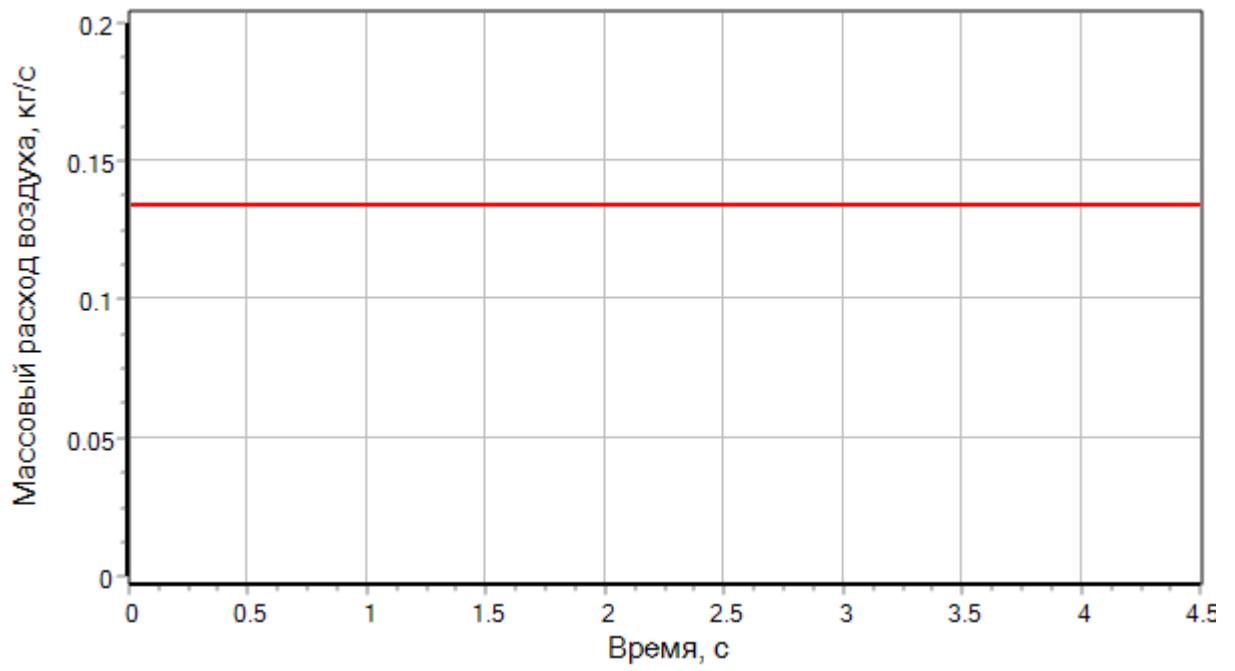


Рисунок Г.13 – Переходный процесс по массовому расходу воздуха через дроссель

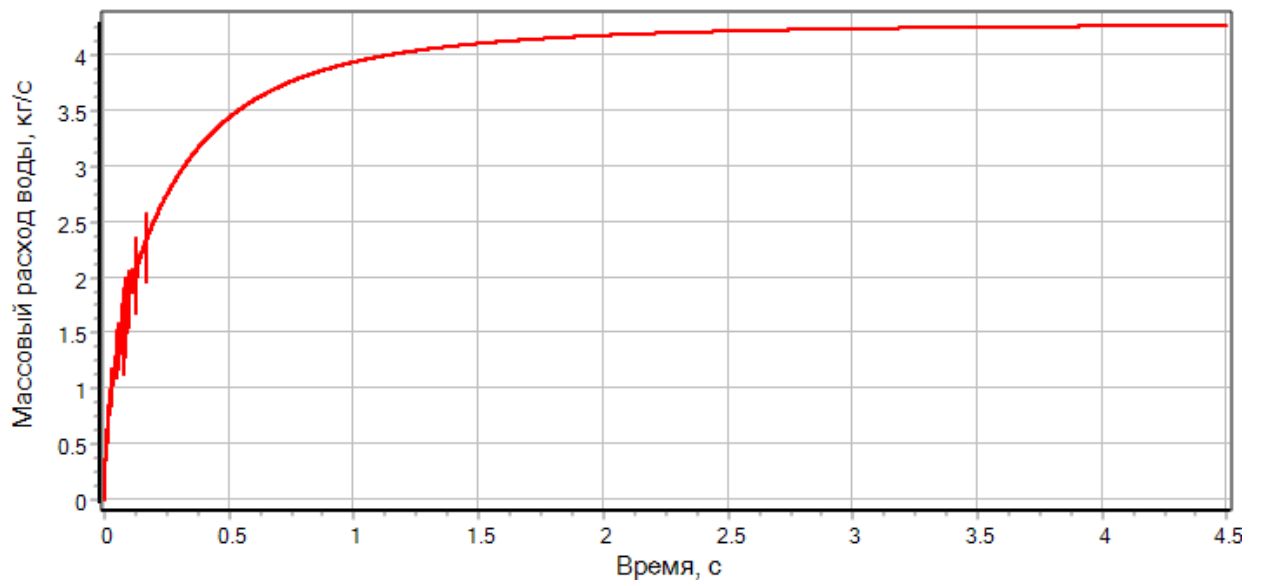


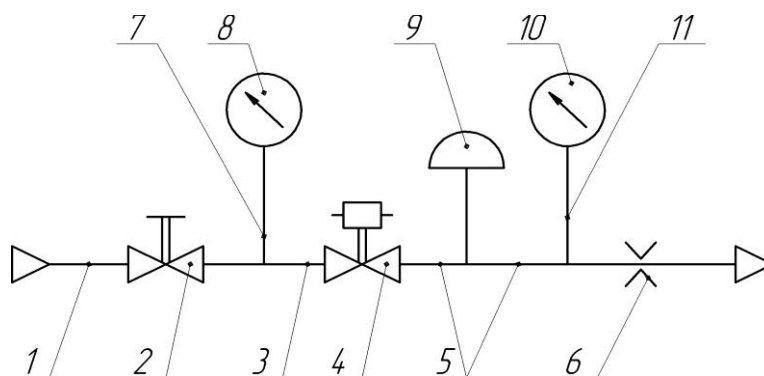
Рисунок Г.14 – Переходный процесс по массовому расходу воды через насадок

Приложение Д

Пример №5. Моделирование работы электропневмоклапана при подаче напряжения в процессе испытаний на время срабатывания

Описание задачи

При экспериментальном определении времени срабатывания электропневмоклапанов (ЭПК) используется схема, представленная на рисунке Д.1. Трубопроводы 1,3,5 и вентиль 2 имеют диаметр условного прохода, равный диаметру условного прохода испытуемого ЭПК. Дроссельная шайба 6 предназначена для создания подпора после испытуемого ЭПК (для имитации потребителя) и имеет диаметр 0,2...0,5 диаметра условного прохода ЭПК. Трубопровод 5 имеет длину около одного метра.



1,3,5,7,11 – трубопровод; 2 – вентиль; 4 – испытуемый ЭПК;
6 – дроссельная шайба; 8,10 – манометр; 9 – датчик давления

Рисунок Д.1 – Схема испытаний ЭПК на время срабатывания

При определении времени срабатывания ЭПК за начало отсчета принимают момент подачи напряжения на обмотку электромагнита, а момент окончания срабатывания может быть определен по изменению тока в катушке электромагнита (для ЭПК прямого действия), срабатыванию концевого выключателя или изменению давления на выходе ЭПК.

Задача: Требуется смоделировать процесс испытаний ЭПК, конструкция которого приведена на рисунке Д.2, и рассчитать переходные процессы:

- по перемещению основного клапана;
- по току в обмотке;
- по абсолютному давлению рабочей среды в выходной полости.

Исходные данные:

- известна конструкция и геометрические размеры ЭПК;
- рабочая среда – воздух;
- абсолютное давление рабочей среды на входе закрытого ЭПК составляет 40,1 МПа;
- температура рабочей среды на входе закрытого ЭПК составляет 293 К;
- известны зависимости потокосцепления обмотки и тягового усилия электромагнита от тока в обмотке и величины рабочего воздушного зазора (получены с помощью численного эксперимента в программе FEMM 4.2).

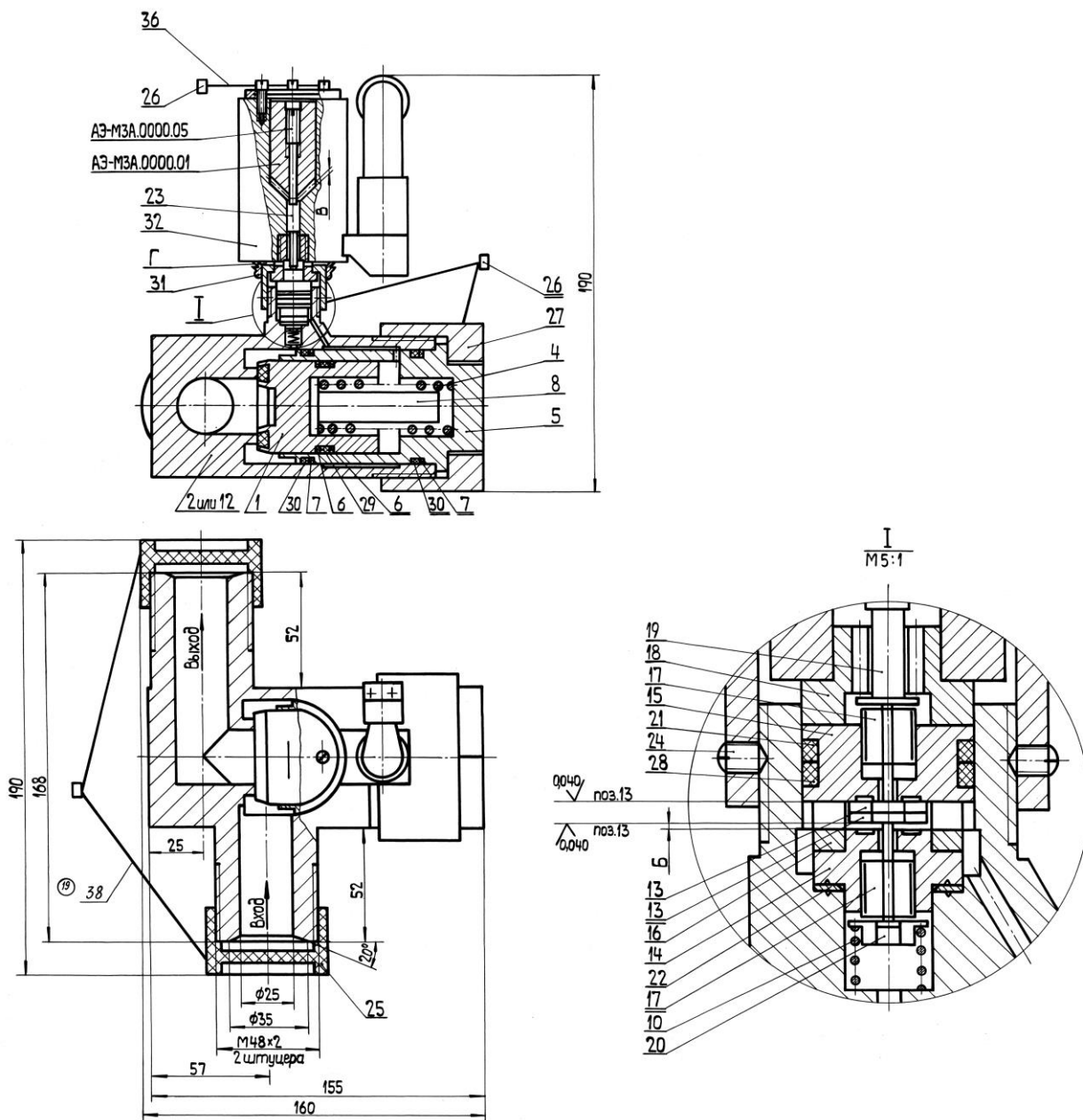


Рисунок Д.2 – Конструкция нормально-закрытого ЭПК с пневмоусилением и дренажом управляющей полости

Принятые допущения и расчетная схема

Примем следующие допущения:

- будем считать, что источник питания обеспечивает постоянство абсолютного давления и температуры рабочей среды во входной полости ЭПК (ограниченной входом в ЭПК и затвором основного клапана);

- т.к. открытие и закрытие ЭПК происходит за малое время, пренебрежем процессами теплообмена между рабочей средой и стенками каналов ЭПК и труб;
- канал, ограниченный затвором основного клапана и дроссельной шайбой будем моделировать как полость, т.е. пренебрежем кинетической энергией потока в этом канале; гидравлическое сопротивление указанного канала приведем к затвору основного клапана, т.е. учтем его в коэффициенте расхода затвора;
- пренебрежем гидравлическим сопротивлением канала от дроссельной шайбы к дренажу; будем считать, что рабочая среда из дроссельной шайбы свободно выходит в атмосферу;
- диаметр дроссельной шайбы примем равным 0,2 от диаметра трубопровода, т.е. 5 мм;
- будем считать, что подача напряжения на обмотку электромагнита ЭПК происходит ступенчато.

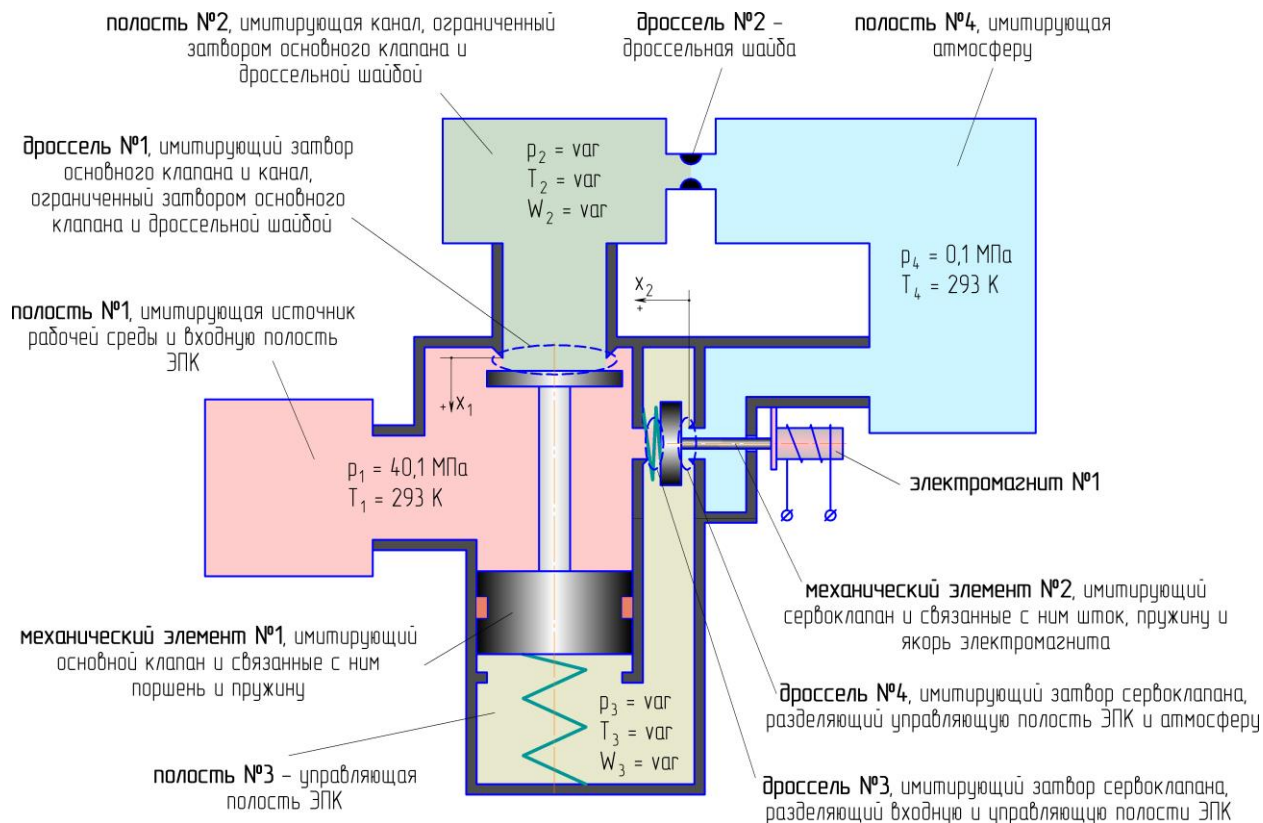
С учетом принятых допущений разобьем моделируемую систему (ЭПК в составе схемы испытаний) на связанные подсистемы различной физической природы:

- **механическая подсистема:**
 - **механический элемент №1**, имитирующий основной клапан и связанные с ним поршень и пружину;
 - **механический элемент №2**, имитирующий сервоклапан и связанные с ним шток, пружину и якорь электромагнита;
- **гидродинамическая подсистема:**
 - **дроссель №1**, имитирующий затвор основного клапана ЭПК и канал, ограниченный затвором основного клапана и дроссельной шайбой;
 - **дроссель №2** – дроссельная шайба;

- **дроссель №3**, имитирующий затвор сервоклапана, разделяющий входную и управляющую полости ЭПК;
- **дроссель №4**, имитирующий затвор сервоклапана, разделяющий управляющую полость ЭПК и атмосферу;
- **термодинамическая подсистема:**
 - **полость №1**, имитирующая источник рабочей среды и входную полость ЭПК;
 - **полость №2**, имитирующая канал, ограниченный затвором основного клапана и дроссельной шайбой;
 - **полость №3** – управляющая полость ЭПК;
 - **полость №4**, имитирующая атмосферу;
- **электромагнитная подсистема:**
 - **электромагнит №1.**

Расчетная схема для моделирования работы ЭПК приведена на рисунке

Д.3.



p_1 - p_4 – абсолютные давления в полостях №1-№4; T_1 - T_4 – температуры в полостях №1-№4; W_2 , W_3 – объемы полостей №2 и №3; x_1 , x_2 – перемещения механических элементов №1 и №2

Рисунок Д.3 – Расчетная схема для моделирования работы ЭПК в составе схемы испытаний

Формирование модели в SimInTech

Для моделирования отдельных объектов (указанных на рисунке Д.3) в SimInTech, в соответствии с принятыми допущениями и расчетной схемой, необходимо использовать блоки библиотеки «ГПС», указанные в таблице Д.1.

Таблица Д.1 – Моделируемые объекты и соответствующие блоки библиотеки «ГПС»

Моделируемый объект (рисунок Д.3)	Блок библиотеки «ГПС»
механический элемент №1	«Механический элемент поступательного движения»
механический элемент №2	«Механический элемент поступательного движения управляемый электромагнитом»

Моделируемый объект (рисунок Д.3)	Блок библиотеки «ГПС»
дроссель №1	«Пневматический турбулентный дроссель с пропорциональным регулированием и насыщением»
дроссель №2	«Пневматический турбулентный дроссель постоянного сечения»
дроссель №3	«Пневматический турбулентный дроссель с пропорциональным регулированием и насыщением»
дроссель №4	«Пневматический турбулентный дроссель с пропорциональным регулированием и насыщением»
полость №1	«Полость с постоянными параметрами газа»
полость №2	«Теплоизолированная полость переменного объема с итерационным характером расчета» или «Теплоизолированная полость переменного объема с прямым характером расчета»
полость №3	
полость №4	
электромагнит №1	«Втяжной электромагнит постоянного тока»

Для осуществления связей между блоками, моделирующими отдельные объекты, используются блоки «Размножитель механический», «Концентратор механический», «Размножитель полостной», «Датчик перемещения».

Модель ЭПК в составе схемы испытаний, сформированная в SimInTech, приведена на рисунке Д.4. Для модели установлены следующие параметры расчета:

- метод интегрирования: Адаптивный 1;
- минимальный шаг интегрирования: 10^{-6} ;
- максимальный шаг интегрирования: 10^{-4} ;
- конечное время расчета: 0,7 с;
- метод итерации петель: Ньютона-Рафсона;
- максимальное количество итераций: 100.

Значения свойств отдельных блоков модели приведены на рисунках Д.5-Д.15.

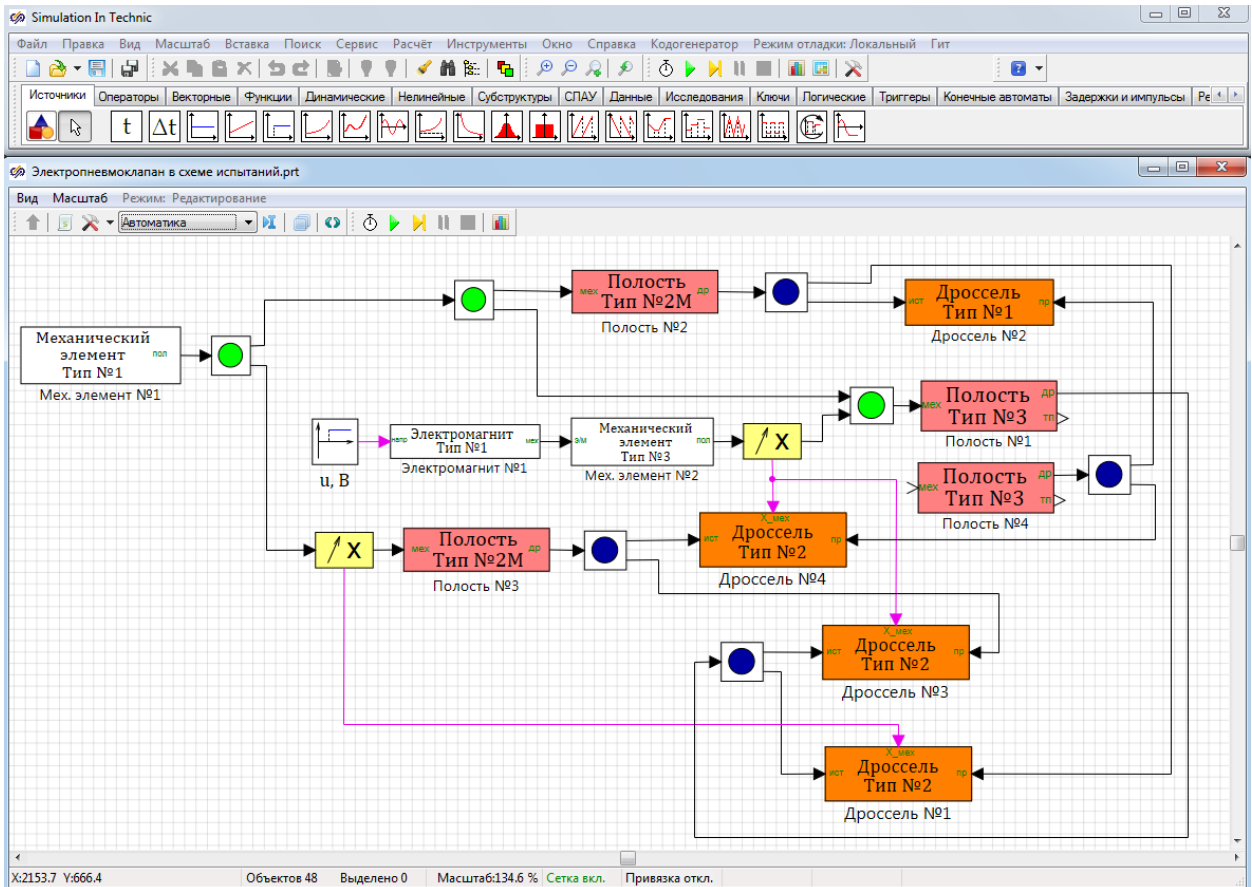


Рисунок Д.4 – Модель ЭПК в составе схемы испытаний в SimInTech

Название	Имя	Значение
Количество полостей, связанных с рассматриваемым механическим элементом	N_pol	3
Масса механического элемента, кг	M_el	0.423
Усилие от позиционной нагрузки (от действия упругих элементов) при нулевом перемещении механического элемента, Н	Fupr_0	1187
Эквивалентная жесткость упругих элементов, Н/м	c_upr	84757
Коэффициент вязкого трения, Н/(м/с)	Kv_tr	600
Начальное перемещение механического элемента, м	X_0	0
Начальная скорость механического элемента, м/с	V_0	0
Минимально возможное перемещение механического элемента, м	X_min	0
Максимально возможное перемещение механического элемента, м	X_max	7e-3
Вектор значений площадей механического элемента, на которые действуют давления в связанных полостях, м ²	S_p	[6.786e-4; 7.069e-4; 13.854e-4]
Сила сухого трения движения, Н	Ftr_dvizh	50
Сила сухого трения страгивания, Н	Ftr_str	150

Рисунок Д.5 – Свойства блока, обозначенного как «Мех. элемент №1»

Название	Имя	Значение
Количество полостей, связанных с рассматриваемым механическим элементом	N_pol	1
Количество электромагнитов, связанных с рассматриваемым механическим элементом	N_em	1
Масса механического элемента, кг	M_el	0.135
Усилие от позиционной нагрузки (от действия упругих элементов) при нулевом перемещении механического элемента, Н	Fupr_0	8.83
Эквивалентная жесткость упругих элементов, Н/м	c_upr	4903
Коэффициент вязкого трения, Н/(м/с)	Kv_tr	0
Начальное перемещение механического элемента, м	X_0	0
Начальная скорость механического элемента, м/с	V_0	0
Минимально возможное перемещение механического элемента, м	X_min	0
Максимально возможное перемещение механического элемента, м	X_max	0.4e-3
Вектор значений площадей механического элемента, на которые действуют давления в связанных полостях, м ²	S_p	[-2.2698e-6]
Сила сухого трения движения, Н	Ftr_dvizh	0
Сила сухого трения страгивания, Н	Ftr_str	0

Рисунок Д.6 – Свойства блока, обозначенного как «Мех. элемент №2»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_prijam	0.82
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	0.82
Определяющий диаметр дросселя, м	d_x	62e-3
Критическое значение перемещения регулирующего элемента, м	X_kr	1.55e-3
Положение регулирующего элемента относительно закрытого состояния дросселя при нулевом перемещении связанного механического элемента, м	X_nach	0
Рабочая среда	gas_type	воздух по Редлиху-Квонгу

Рисунок Д.7 – Свойства блока, обозначенного как «Дроссель №1»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_prijam	0.9
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	0.9
Диаметр дросселя при прямом токе рабочей среды, м	d_dr_prijam	5e-3
Диаметр дросселя при обратном токе рабочей среды, м	d_dr_obr	5e-3
Рабочая среда	gas_type	воздух по Редлиху-Квонгу

Рисунок Д.8 – Свойства блока, обозначенного как «Дроссель №2»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_prijam	0.82
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	0.82
Определяющий диаметр дросселя, м	d_x	1.7e-3
Критическое значение перемещения регулирующего элемента, м	X_kr	0.11e-3
Положение регулирующего элемента относительно закрытого состояния дросселя при нулевом перемещении связанного механического элемента, м	X_nach	0.4e-3
Рабочая среда	gas_type	воздух по Редлиху-Квонгу

Рисунок Д.9 – Свойства блока, обозначенного как «Дроссель №3»

Название	Имя	Значение
Коэффициент массового расхода дросселя при прямом токе рабочей среды	mu_dr_prijam	0.82
Коэффициент массового расхода дросселя при обратном токе рабочей среды	mu_dr_obr	0.82
Определяющий диаметр дросселя, м	d_x	1.7e-3
Критическое значение перемещения регулирующего элемента, м	X_kr	0.11e-3
Положение регулирующего элемента относительно закрытого состояния дросселя при нулевом перемещении связанного механического элемента, м	X_nach	0
Рабочая среда	gas_type	воздух по Редлиху-Квонгу

Рисунок Д.10 – Свойства блока, обозначенного как «Дроссель №4»

Название	Имя	Значение
Электрическое сопротивление обмотки, Ом	r_obm	49
Угол конуса якоря, градусы	alfa_jak	100
Минимальный рабочий воздушный зазор, м	delta_min	0.5e-3
Максимально возможное перемещение связанного механического элемента, м	x_max	0.4e-3
Показатель приращения рабочего зазора при положительном приращении перемещения связанного механического элемента	rok_delta_x	-1
Начальное перемещение связанного механического элемента, м	x_0	0
Начальный ток в обмотке, А	i_0	0
Электромагнит	electromagnet_tyf	электромагнит АЭ-М3А

Рисунок Д.11 – Свойства блока, обозначенного как «Электромагнит №1»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	40.1e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	293
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок Д.12 – Свойства блока, обозначенного как «Полость №1»

Название	Имя	Значение
Начальное абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_0	0.1e6
Начальная термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_0	293
Объем полости при нулевых перемещениях связанных с ней механических элементов, м ³	W_x_0	0.000547
Вектор начальных перемещений связанных механических элементов, м	X_0	[0]
Количество дросселей (каналов), связанных с полостью	N_dr	2
Количество механических элементов, связанных с рассматриваемой полостью	N_meh	1
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления объемной связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_W	[7.069e-4]
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления силовой связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_p	[7.069e-4]
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок Д.13 – Свойства блока, обозначенного как «Полость №2»

Название	Имя	Значение
Начальное абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_0	40.1e6
Начальная термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_0	293
Объем полости при нулевых перемещениях связанных с ней механических элементов, м ³	W_x_0	0.000027
Вектор начальных перемещений связанных механических элементов, м	X_0	[0]
Количество дросселей (каналов), связанных с полостью	N_dr	2
Количество механических элементов, связанных с рассматриваемой полостью	N_meh	1
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления объемной связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_W	[-13.854e-4]
Вектор значений площадей поверхностей механических элементов для осуществления силовой связи блоков "Полость. Тип №2" и "Механический элемент", м ²	S_meh_p	[-13.854e-4]
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок Д.14 – Свойства блока, обозначенного как «Полость №3»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	0.1e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	293
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок Д.15 – Свойства блока, обозначенного как «Полость №4»

Результаты моделирования в SimInTech

Результаты моделирования процессов в ЭПК при его испытании на время срабатывания приведены на рисунках Д.16-Д.18.

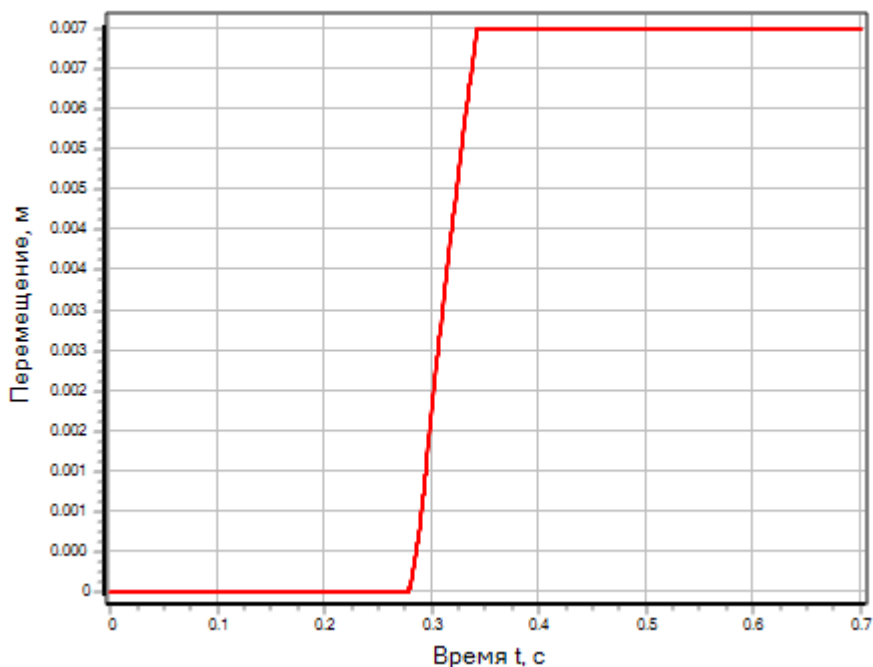


Рисунок Д.16 – Переходный процесс по перемещению основного клапана

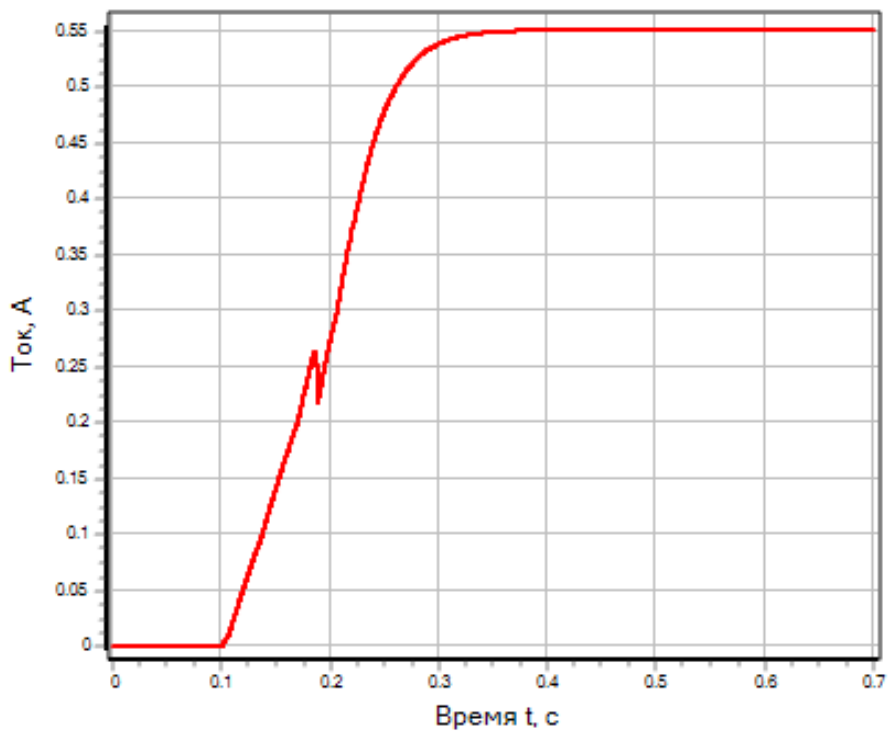


Рисунок Д.17 – Переходный процесс по току в обмотке электромагнита

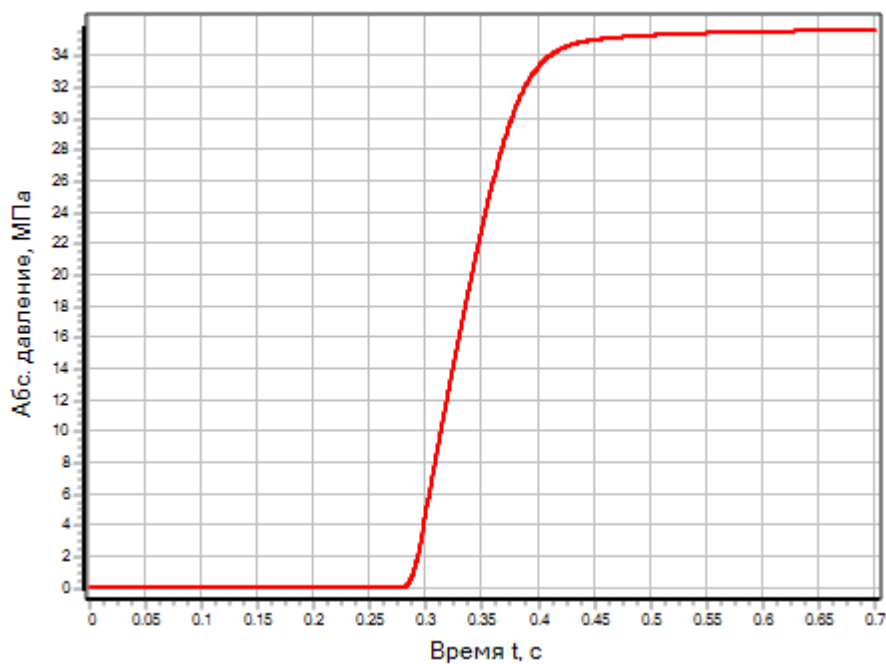


Рисунок Д.18 – Переходный процесс по абсолютному давлению
в выходной полости

Приложение Е

Пример №6. Моделирование процесса охлаждения стального шара в холодильной камере

Описание задачи

Рассматривается процесс охлаждения стального шара после помещения его в холодильную камеру (рисунок Е.1). Считается, что поверхность шара контактирует только с воздухом внутри камеры. Считается, что внутренний объем камеры настолько велик, что тепло, поступающее от шара к воздуху, не оказывает влияния на изменение термических параметров последнего.

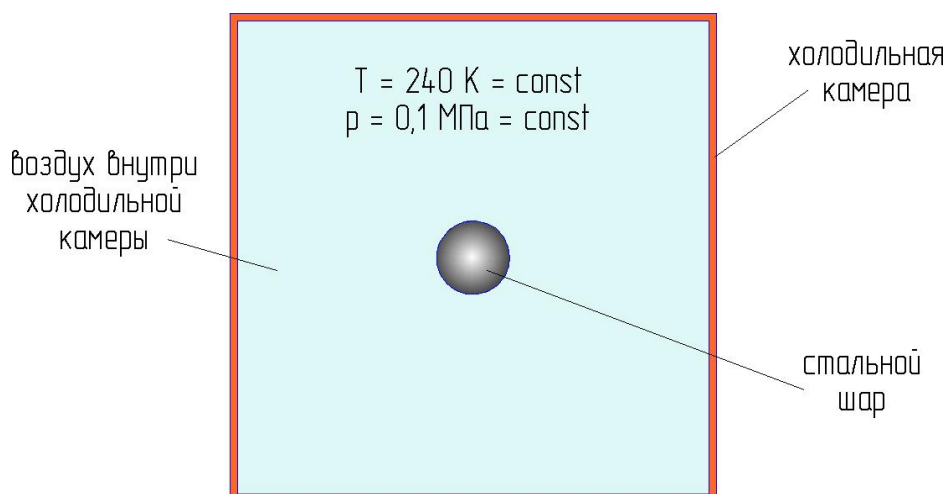


Рисунок Е.1 – Шар в холодильной камере

Задача: Требуется смоделировать процесс охлаждения шара и рассчитать переходные процессы:

- по средней температуре шара;
- по тепловому потоку между шаром и воздухом в холодильной камере.

Исходные данные:

Исходные данные приведены в таблице Е.1.

Таблица Е.1 – Исходные данные для моделирования

Параметр	Единицы	Значение
Рабочая среда	–	воздух
Материал шара	–	сталь 12Х13Н10Т
Абсолютное давление рабочей среды в камере	МПа	0,1

Параметр	Единицы	Значение
Температура рабочей среды в камере	К	240
Радиус шара	м	0,05
Масса шара	кг	4,136
Площадь поверхности шара	м ²	0,03142
Начальная средняя температура шара	К	293

Принятые допущения и расчетная схема

Примем следующие допущения:

- принимаем, что величина теплового потока, идущего от поверхности шара к воздуху в камере, зависит только от площади поверхности шара (поверхности теплообмена) и разности температур шара и воздуха; указанные зависимости считаем прямопропорциональными;
- считаем, что шар не контактирует со стенками и другими элементами камеры;
- считаем, что внутренний объем камеры настолько велик, что тепло, поступающее от шара к воздуху, не оказывает влияния на изменение термических параметров последнего.

С учетом принятых допущений разобьем моделируемую систему (стальной шар в холодильной камере) на связанные подсистемы различной физической природы:

- **термодинамическая подсистема:**
 - **полость №1**, имитирующая воздух в холодильной камере;
 - **твердое тело №1**, имитирующее стальной шар;
- **тепловая подсистема:**
 - **элемент теплопередачи №1**, имитирующий передачу тепла от поверхности шара к воздуху в камере.

Расчетная схема для моделирования процесса охлаждения стального шара в холодильной камере приведена на рисунке Е.2.

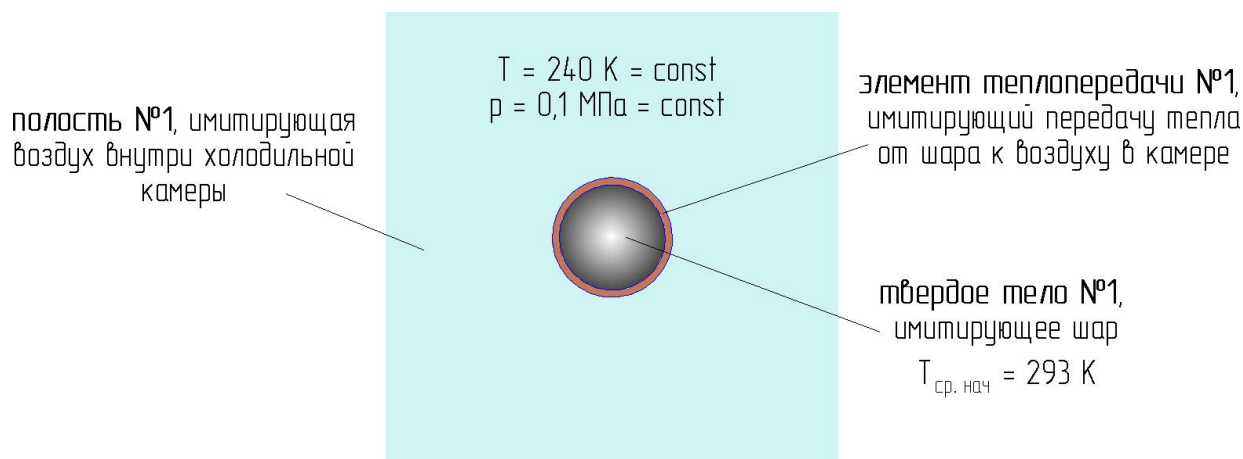


Рисунок Е.2 – Расчетная схема для моделирования процесса охлаждения шара в холодильной камере

Формирование модели в SimInTech

Для моделирования отдельных объектов (указанных на рисунке Е.2) в SimInTech, в соответствии с принятыми допущениями и расчетной схемой, необходимо использовать блоки библиотеки «ГПС», указанные в таблице Е.2.

Таблица Е.2 – Моделируемые объекты и соответствующие блоки библиотеки «ГПС»

Моделируемый объект (рисунок Е.2)	Блок библиотеки «ГПС»
полость №1	«Полость с постоянными параметрами газа»
твердое тело №1	«Термодинамика твёрдого тела в точечном приближении»
элемент теплопередачи №1	«Теплопередача с постоянным коэффициентом»

Модель стального шара в холодильной камере, сформированная в SimInTech из блоков библиотеки «ГПС», приведена на рисунке Е.3.

Для модели установлены следующие параметры расчета:

- метод интегрирования: Адаптивный 1;
- минимальный шаг интегрирования: 10^{-6} ;
- максимальный шаг интегрирования: 10^{-2} ;
- конечное время расчета: $1 \cdot 10^4$ с;

- метод итерации петель: Ньютона-Рафсона;
- максимальное количество итераций: 100.

Значения свойств отдельных блоков модели приведены на рисунках Е.4-Е.6.

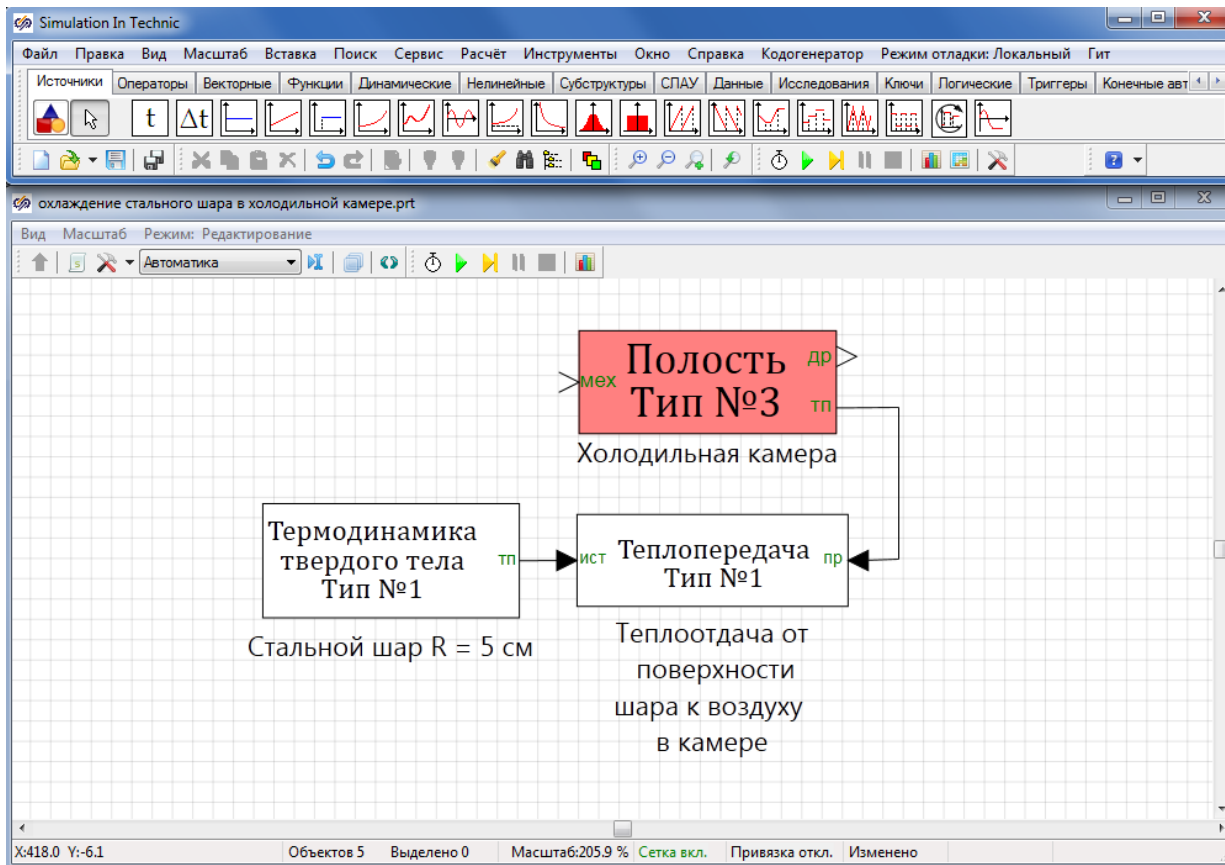


Рисунок Е.3 – Модель шара в холодильной камере, сформированная из блоков библиотеки «ГПС»

Название	Имя	Значение
Абсолютное давление рабочей среды в полости, Па	p_pol	0.1e6
Термодинамическая температура рабочей среды в полости, К	T_pol	240
Рабочая среда	fluid_type	воздух (газ) по Редлиху-Квонгу

Рисунок Е.4 – Свойства блока, обозначенного как «Холодильная камера»

Название	Имя	Значение
Масса тела, кг	M_tel	4.136
Материал тела	material_type	сталь 12X13H10T
Начальная средняя термодинамическая температура тела, К	T_tel_sr_0	293
Количество тепловых связей	N_tep1	1

Рисунок Е.5 – Свойства блока, обозначенного на рисунке 3 как «Стальной шар R = 5 см»

Название	Имя	Значение
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² *К)	alfa	20
Площадь теплообмена, м ²	f_tepl	0.03142

Рисунок Е.6 – Свойства блока, обозначенного как
«Теплоотдача от поверхности шара к воздуху в камере»

Результаты моделирования в SimInTech

Результаты моделирования процесса охлаждения стального шара приведены на рисунках Е.7, Е.8.

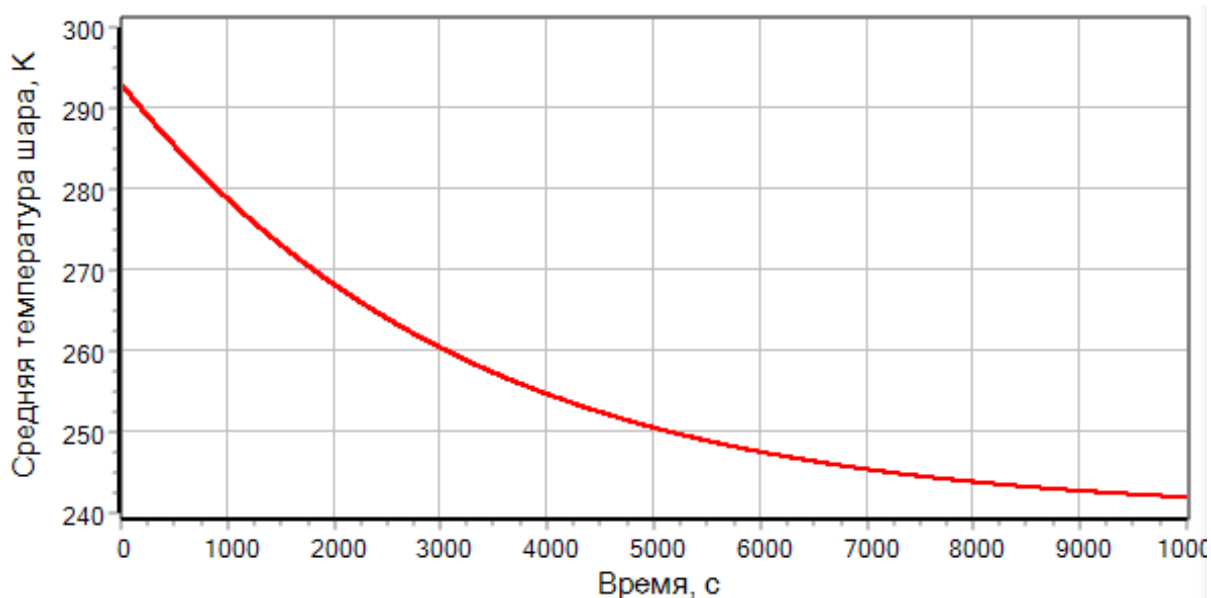


Рисунок Е.7 – Переходный процесс по средней температуре шара

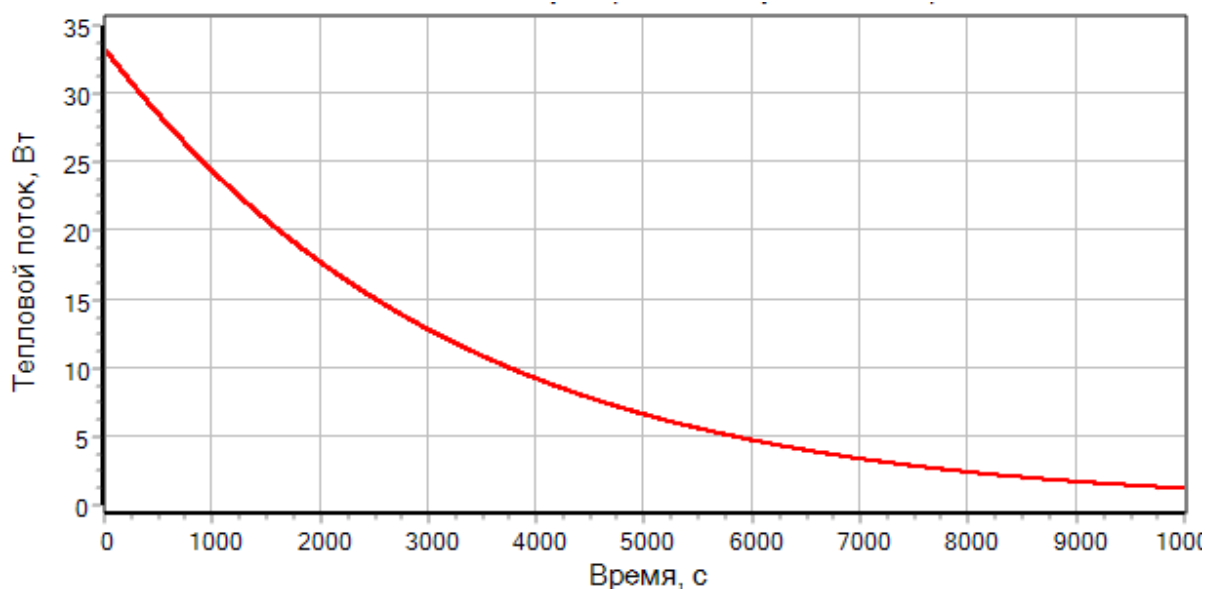


Рисунок Е.8 – Переходный процесс по тепловому потоку между шаром и воздухом в камере