



Техническое задание

Основная задача: Необходимо рассчитать время перемещения газа (водорода) из емкости хранения объемом V_0 в емкость бака автомобиля $V_{авт}$. Схема трубопровода хранилища представлена на схеме 1.

Дополнительные задачи:

1. За какое время давление в баке авто достигнет значения 700 атм?
2. Если давление уравнивания находится ниже значения 700 атм, указать это давление.
3. Построить график ускорения потока газа (изменение скорости перетока во времени) на весь период перетока.
4. Определить объем емкости хранения V_0 , при котором время перетока будет составлять 3 минуты.

Исходные данные

Термодинамические данные

Температура окружающей среды:

$T_{OC} := 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рабочее вещество:

Водород 4.5

Начальное давление в емкости хранения:

$p_0 := 850\text{ атм}$

Объем емкости хранения:

$V_0 := 625\text{ л}$

Объем мобильной емкости:

$V_{авт} := 120\text{ л}$

Продувка осуществляется рабочим газом:

Азот

Давление вакуумирования (опционально, абс):

$p_{vc} := 0$

Желаемое давление в мобильной емкости:

$p_{авт} := 700\text{ атм}$

Трубопроводы, арматура и прочее

Номинальный диаметр труб:

$D_{y'} := \frac{3}{8} \cdot 25.4\text{ мм} = 9.5 \cdot \text{мм}$

Проходной диаметр труб: *

$D_y := 10\text{ мм}$

* ГОСТ 28338-89 (доп. ГОСТ 9617-76). При переводе проходного диаметра (дюйм - мм) значение округляется до ближайшего значения из стандартного ряда, мм: 6, 10, 15, 20, 25, 32, 40, 50, 65, 80, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500 и т.д.

1. Параметры элементов гидравлической схемы

1. Трубопровод от рампы хранилища до заправочного устройства

Диаметр: $D_{px_zy} := D_y = 10 \cdot \text{мм}$

Длина: $l_{px_zy} := 2\text{м} = 2000 \cdot \text{мм}$

2. Трубопровод от заправочного устройства до автомобиля

Диаметр: $D_{zy_a} := D_y = 10 \cdot \text{мм}$

Длина: $l_{zy_a} := 4\text{м} = 4000 \cdot \text{мм}$

3. Кран шаровой

Для шарового крана возможно 3 положения: закрыт, открыт и частично открыт. Для последнего варианта положения запорного устройства гидравлическое сопротивление крана варьируется от минимального значения, соответствующего сопротивлению прямолинейного участка трубопровода, до максимального, при котором процесс перетекания газа сопровождается его дросселированием в заполняемый объем с постоянно повышающимся давлением.

Для выполнения первой итерации расчета положим, что состояние запорного элемента соответствует положению "открыт". Из анализа открытых коммерческих предложений выявлена средняя длина запорных устройств высокого давления без монтажных рукавов для указанного проходного диаметра ([1, BVD-T-10L]).

Диаметр: $D_{кш} := D_y = 10 \cdot \text{мм}$

Длина: $l_{кш} := 40\text{мм}$

4. Клапан электромагнитный

Диаметр: $D_{кэм} := D_y = 10 \cdot \text{мм}$

Длина: $l_{кэм} := 40\text{мм}$

5. Муфта разрывная

Поведение потока при протекании через разрывную муфту аналогичен течению между стенкой и торцом полого цилиндра (см. рис.1.1 [2, стр. 49]).

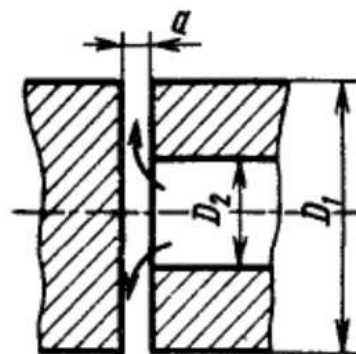


Рисунок 1.1. Схема течения между стенкой и торцом полого цилиндра

Диаметр: $D_{\text{мр1}} := D_y = 10 \cdot \text{мм}$

Диаметр: * $D_{\text{мр2}} := 0.5D_y = 5 \cdot \text{мм}$

Зазор: * $a_{\text{мр}} := 0.4D_y = 4 \cdot \text{мм}$

Длина: $l_{\text{мр}} := 40\text{мм}$

* Требуется уточнение коэффициентов или размеров используемой муфты.

2. Обоснование метода расчета термодинамических свойств

Величина, обратная коэффициенту сжимаемости водорода, в области высоких значений давления при температуре окружающей среды:

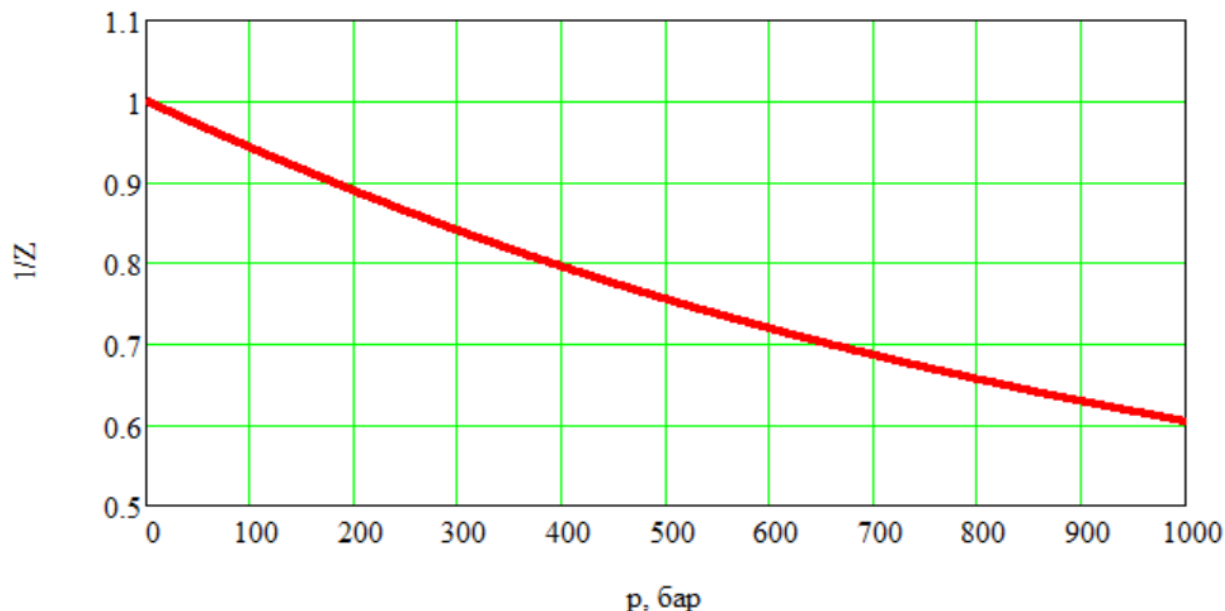


Рисунок 2.1. Зависимость $1/z$ от давления (абс.) при температуре окружающей среды

Использование уравнения Менделеева-Клапейрона и законов для изопроцессов в данном расчете без учета коэффициента сжимаемости приведет к значительным ошибкам в расчете, поэтому для получения относительно точных результатов будет использоваться библиотека термодинамических свойств NIST. В области высоких давлений (атмосферное и более) и высоких температур (от комнатных и более) отклонение расчетных значений термодинамических свойств от справочных не более 3%.

Допущения, уравнения состояния, степень точности и сходимость моделей представлены в официальной документации [3] и в описании соответствующих уравнений состояния.

3. Пересчет давлений

Для расчета термодинамических свойств требуется привести избыточное давление к абсолютному значению.

Во всех местах расчета, кроме указанных особо, давление абсолютное, представлено в [бар].

Начальное давление в емкости хранения:

$$p_{0_абс} := p_0 + 1 \text{ атм} = 862.3 \cdot \text{бар}$$

Желаемое давление в мобильной емкости:

$$p_{авт_абс} := p_{авт} + 1 \text{ атм} = 710.3 \cdot \text{бар}$$

4. Свободный объем трубопровода и заправляемой емкости

Объем прямолинейных участков труб (трубы одинакового проходного диаметра по условию):

1. Трубопровод от рампы хранилища до заправочного устройства

$$V_{px_zy} := \frac{\pi \cdot D_{px_zy}^2}{4} \cdot l_{px_zy} = 157079.6 \cdot \text{мм}^3$$

2. Трубопровод от заправочного устройства до автомобиля

$$V_{zy_a} := \frac{\pi \cdot D_{zy_a}^2}{4} \cdot l_{zy_a} = 314159.3 \cdot \text{мм}^3$$

3. Кран шаровой

$$V_{кш} := \frac{\pi \cdot D_{кш}^2}{4} \cdot l_{кш} = 3141.6 \cdot \text{мм}^3$$

4. Клапан электромагнитный

$$V_{кэм} := \frac{\pi \cdot D_{кэм}^2}{4} \cdot l_{кэм} = 3141.6 \cdot \text{мм}^3$$

5. Муфта разрывная

Коэффициент свободного объема: $k_{co} := 0.8$

$$V_{mp} := k_{co} \frac{\pi \cdot D_{mp1}^2}{4} \cdot l_{mp} = 2513.3 \cdot \text{мм}^3$$

Суммарный свободный объем:

$$V_{free} := V_{px_zy} + V_{zy_a} + 2 \cdot V_{кш} + V_{кэм} + V_{mp} + V_{авт} = 120483177 \cdot \text{мм}^3$$

$$V_{free} = 0.12048 \cdot \text{м}^3$$

5. Чистота заправляемой смеси

Перед заправкой магистраль и заправляемая емкость продуваются азотом. Определим чистоту водорода в заправленной емкости.

Плотность водорода при условиях в мобильной емкости (принимается, что газ в баллоне находится в равновесии с ОС, имеющиеся примеси и поджатый азот незначительны):

$$\rho_{\text{авт}} := \rho_{\text{Трз}}(T_{\text{ОС}}, p_{\text{авт_абс}}, x_{\text{H}_2}) = 40.1 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Масса водорода в мобильной емкости (если нет азота):

$$m_{\text{авт}} := \rho_{\text{авт}} \cdot (V_{\text{авт}}) = 4.8104 \cdot \text{кг}$$

Масса водорода в свободном объеме (если нет азота):

$$m_{\text{free}} := \rho_{\text{авт}} \cdot (V_{\text{free}}) = 4.8298 \cdot \text{кг}$$

Плотность продувочного азота при температуре ОС и атмосферном давлении:

$$\rho_{\text{N}_2} := \rho_{\text{Трз}}(T_{\text{ОС}}, 1\text{атм}, x_{\text{N}_2}) = 1.16 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Масса азота в свободном объеме после продувки:

$$m_{\text{N}_2} := \rho_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{free}} = 0.14 \cdot \text{кг}$$

Молекулярные массы:

$$\mu_{\text{H}_2} := 2.016 \frac{\text{г}}{\text{моль}} \quad \mu_{\text{N}_2} := 28.013 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$$

Истинная масса водорода в свободном объеме:

Приближение: $m_{\text{H}_2} := 4\text{кг}$

Given

$$m_{\text{N}_2} + m_{\text{H}_2} = \rho_{\text{Трз}} \left(T_{\text{ОС}}, p_{\text{авт_абс}}, \left[\frac{m_{\text{H}_2} \cdot \mu_{\text{H}_2}^{-1}}{\left(m_{\text{N}_2} \cdot \mu_{\text{N}_2}^{-1} + m_{\text{H}_2} \cdot \mu_{\text{H}_2}^{-1} \right)} \right] \cdot V_{\text{free}} \right)$$

$$m_{\text{H}_2} := \text{Find}(m_{\text{H}_2}) = 4.8182 \cdot \text{кг}$$

Концентрация (мольная) водорода в заправляемом газе с примесями:

$$C_{H_2} := \frac{m_{H_2} \cdot \mu_{H_2}^{-1}}{m_{N_2} \cdot \mu_{N_2}^{-1} + m_{H_2} \cdot \mu_{H_2}^{-1}} = 0.99791$$

Чистота водорода в емкости хранения (по условию):

$$C_{H_2_0} = 0.99995$$

Концентрация (мольная) водорода в заправляемом газе (чистота):

$$C_{H_2_pure} := C_{H_2} \cdot C_{H_2_0} = 0.99786$$

В случае необходимости сохранения более высокой степени чистоты следует реализовывать вакуумирование свободного объема.

6. Оценка вместимости хранилища

Располагаемая масса водорода в емкости хранения:

$$m_0 := V_0 \cdot \rho_{\text{Tpz}}(T_{\text{OC}}, p_{0_абс}, x_{\text{H}_2}) = 28.4607 \cdot \text{кг}$$

После установления равновесия масса смеси (водорода и азота):

$$m_{\Sigma} := m_0 + m_{\text{N}_2} = 28.601 \cdot \text{кг}$$

Полный объем гидравлической системы с учетом труб, арматуры, запраляемой емкости и емкости хранения:

$$V_{\Sigma} := V_{\text{free}} + V_0 = 0.745 \cdot \text{м}^3$$

Плотность смеси:

$$\rho_{\text{mix}} := \frac{m_{\Sigma}}{V_{\Sigma}} = 38.4 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Концентрация (мольная) водорода в смеси:

$$C_{\text{H}_2_mix} := \frac{m_0 \cdot \mu_{\text{H}_2}^{-1}}{(m_{\text{N}_2} \cdot \mu_{\text{N}_2}^{-1} + m_0 \cdot \mu_{\text{H}_2}^{-1})} = 0.99965$$

Давление равновесия:

Приближение: $p_{\text{balance}} := 500 \text{ бар}$

Given

$$\rho_{\text{Tpz}} \left[T_{\text{OC}}, p_{\text{balance}}, \begin{pmatrix} C_{\text{H}_2_mix} \\ 1 - C_{\text{H}_2_mix} \end{pmatrix} \right] = \rho_{\text{mix}}$$

$$p_{\text{balance_abs}} := \text{Find}(p_{\text{balance}}) = 661.8 \cdot \text{бар}$$

Перевод давления равновесия из абсолютного в избыточное:

$$p_{\text{balance}} := p_{\text{balance_abs}} - 1 \text{ атм} = 652.1 \cdot \text{атм}$$

Расчет необходимого объема емкости хранения для достижения давления равновесия, указанного в условии, выполним через ряд функциональных зависимостей (аналогично определению давления равновесия):

$$m_0(V_0, p_0) := V_0 \cdot \rho_{\text{TPz}}(T_{\text{OC}}, p_{0_а\bar{б}с}, x_{\text{H2}})$$

$$m_{\Sigma}(V_0, p_0) := m_0(V_0, p_0) + m_{\text{N2}}$$

$$V_{\Sigma}(V_0, p_0) := V_{\text{free}} + V_0$$

$$\rho_{\text{mix.}}(V_0, p_0) := \frac{m_{\Sigma}(V_0, p_0)}{V_{\Sigma}(V_0, p_0)}$$

$$C_{\text{H2_mix.}}(V_0, p_0) := \frac{m_0(V_0, p_0) \cdot \mu_{\text{H2}}^{-1}}{(m_{\text{N2}} \cdot \mu_{\text{N2}}^{-1} + m_0(V_0, p_0) \cdot \mu_{\text{H2}}^{-1})}$$

Требуется объем емкости хранения:

Приближение: $V_0 := 700\text{л}$

Given

$$\rho_{\text{TPz}} \left[T_{\text{OC}}, p_{\text{balance}}, \left(\frac{C_{\text{H2_mix.}}(V_0, p_0)}{1 - C_{\text{H2_mix.}}(V_0, p_0)} \right) \right] = \rho_{\text{mix.}}(V_0, p_0)$$

$$V_0(p_{\text{balance}}, p_0) := \text{Find}(V_0)$$

$$V_0(p_{\text{авт_а\bar{б}с}}, p_{0_а\bar{б}с}) = 884 \cdot \text{л}$$

Задача 2. - Объем емкости хранения водорода недостаточен для заправки мобильных емкостей всех указанных объемов.

Минимальный объем емкости хранения, обеспечивающий значение равновесного давления выше, чем необходимо для заправки одной мобильной емкости, и равновесное давление, которое установится в системе:

Объем баллона автомобиля, л:	120	150	82
Равновесное давление, атм:	652.1	616.3	703.9
Необходимый объем емкости, л:	884	1104.2	625.2

До требуемого давления может быть заправлена емкость с объемом до 82 литров.

7. Математическая модель процесса истечения

Требуется определить гидравлические параметры потока газа, выходящего из одного постоянного конечного объема в другой. При это в первом объеме происходит постоянное падение давления, а во втором - увеличение. Для описания процесса истечения газа вводятся следующие допущения:

1. В расчете не учитываются нивелирные высоты (давление столба газа);
2. Скорость газа в объеме, из которого происходит истечение, мала по сравнению со скоростью истечения газа, поэтому в расчете принимает нулевое значение;
3. В преобладающей части расчета газ (водород) принимается идеальным, что справедливо при невысоких значениях температуры и давления (в значительном отдалении от парожидкостной кривой, нормальные условия). Для уточнения рассчитываемых параметров используется прямой расчет плотности по термодинамическим свойствам, а не уравнение идеального газа.

Скорость истечения

Уравнение движения для идеального газа [4, стр. 324]:

$$\frac{U_1^2}{2} + \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} + g \cdot z_1 = \frac{U_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2} + g \cdot z_2$$

где: k - показатель адиабаты;
 U - скорости потока в сечениях;
 p - давление потока в сечениях;
 ρ - плотность потока в сечениях;
 z - нивелирные высоты;
 g - ускорение свободного падения;

С учетом введенных допущений:

$$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{U_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2}$$

Выразим скорость истечения потока:

$$U_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} \right)}$$

Примем следующие обозначения для сечений и точек потока:

- 1, i** - сечение во внутреннем объеме емкости хранения, изменяющиеся во времени параметры;
- 2** - сечения в свободном объеме после места истечения, но в непосредственной близости с ним, изменяющиеся во времени параметры;
- 0** - сечение во внутреннем объеме емкости хранения в начальный момент времени, при котором газу соответствуют параметры с индексом 0, которые не изменяются во времени

После определения давления в емкости хранения и в области истечения будет возможен расчет скорости истечения по формуле:

$$U_2(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \left(\frac{p_i}{\rho_i = f(p_i, T, x)} - \frac{p_2 = f(p_i)}{\rho_2 = f(p_2, T, x)} \right)}$$

Уравнение неразрывности и закон сохранения массы

Массовый расход перетекающего газа через отверстие площадью f со скоростью U :

$$m = U \cdot f \cdot \rho_2 = f \cdot \rho_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} \right)}$$

С учетом допущений:

$$\frac{p_2}{\rho_2^{\frac{1}{k}}} = \frac{p_1}{\rho_1^{\frac{1}{k}}} \quad \rho_2 = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}$$

Тогда:

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

Положим, что в некоторый момент времени после начала истечения давление в емкости хранения p_1 и плотность ρ_1 . Элементарная масса dm газа, прошедшего через место истечения площадью f за отрезок времени dt равна:

$$m = U \cdot f \cdot \rho_2 = f \cdot \rho_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

Введем функцию:

$$\varphi = \sqrt{\frac{k}{k-1}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}}}$$

Приведенная функция определяет параметры критического расширения, ее исследование позволит определить наибольшую скорость истечения и, как следствие, максимальный расход газа. Для удобства сделаем замену:

$$x = \frac{p_2}{p_1}$$

Тогда:

$$\varphi(x) = \sqrt{\frac{k}{k-1}} \cdot \sqrt{x^{\frac{2}{k}} - x^{\frac{k+1}{k}}}$$

Абцисса, соответствующая экстремуму данной функции:

$$x_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Зададим значения показателя адиабаты и показателя политропы для процесса расширения:

$$k := 1.41$$

$$n := 1.3$$

Значение функции при критическом соотношении давления:

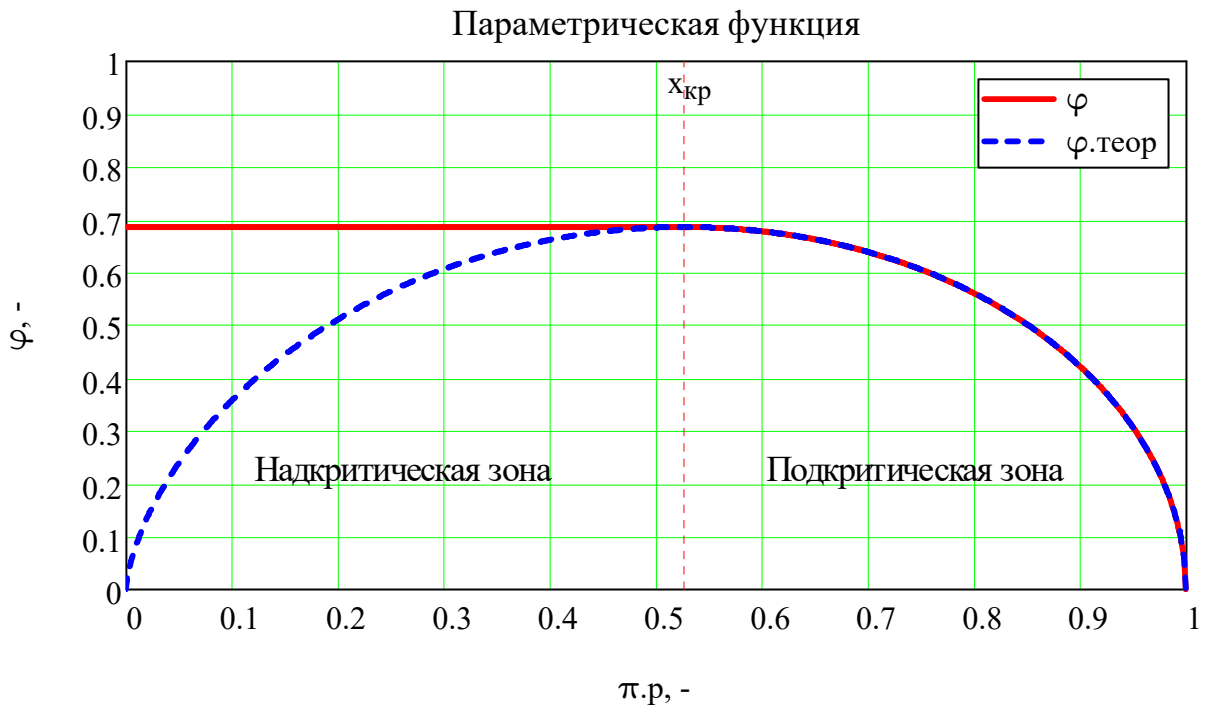
$$x_{кр} := \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0.527$$

$$\varphi_{max} := \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \left(x_{кр}^{\frac{2}{k}} - x_{кр}^{\frac{k+1}{k}} \right)} = 0.686$$

Поскольку наличие экстремума разделяет расчетную область на подкритическую и надкритическую зоны, то параметрически заданная функция критических параметров отличается от теоретической ввиду большей согласованности с опытом.

$$\varphi_{\text{теор}}(\pi_p) := \begin{cases} \text{return } \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \left(\pi_p^{\frac{2}{k}} - \pi_p^{\frac{k+1}{k}} \right)} & \text{if } 0 < \pi_p < 0.9999 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\varphi(\pi_p) := \begin{cases} \text{return } \varphi_{\text{max}} & \text{if } 0 \leq \pi_p < x_{\text{кр}} \\ \text{return } \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \left(\pi_p^{\frac{2}{k}} - \pi_p^{\frac{k+1}{k}} \right)} & \text{if } x_{\text{кр}} < \pi_p < 0.9999 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



Максимальная скорость истечения (местная скорость звука):

$$U_{\text{max}} := \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{p_{0_абс}}{\rho_{\text{Трз}}(T_{\text{ОС}}, p_{0_абс}, x_{\text{H2}})}} \cdot \left[1 - \left(x_{\text{кр}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = 1488.5 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

С учетом введения параметрической функции уравнение массового расхода:

$$m = \varphi \cdot f \cdot \sqrt{p_1 \cdot \rho_1}$$

$$dm = m \cdot dt = \varphi \cdot f \cdot \sqrt{p_i \cdot \rho_i} \cdot dt$$

где: p_i, ρ_i - текущие давление и плотность в емкости хранения;

С учетом допущений (в данном случае происходит не теоретический адиабатный процесс, а политропный):

$$\frac{p_2}{\rho_2^n} = \frac{p_1}{\rho_1^n} \quad \rho_2 = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Тогда:

$$* dm = \varphi \cdot f \cdot \sqrt{p_i \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{n}}} \cdot dt = \varphi \cdot f \cdot \sqrt{\rho_0 \cdot p_0} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{n+1}{n}}} \cdot dt$$

* Данное уравнение может быть записано без внедрения политропной зависимости, но это потребует аналитического представления функции плотности в прямой зависимости от давления в емкости хранения:

$$dm = \varphi \cdot f \cdot \sqrt{p_i \cdot \rho_i(p_i, T, x)} \cdot dt$$

С другой стороны (со стороны свободного объема, поэтому при уравнивании приращений массы значения будут взяты с противоположным знаком):

$$dm = V_0 \cdot d\rho_i$$

С учетом допущений:

$$dm = V_0 \cdot \rho_0 \cdot d \left[\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right] = \frac{V_0}{n} \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{n}-1} d \left(\frac{p_i}{p_0} \right)$$

Уравнивая два выражения приращения массы (с учетом направления процессов):

$$\frac{V_0}{n} \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{n}-1} d \left(\frac{p_i}{p_0} \right) = -\varphi \cdot f \cdot \sqrt{\rho_0 \cdot p_0} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{n+1}{n}}} \cdot dt$$

Упрощая выражение:

$$\frac{1}{n} \cdot \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{2n} - \frac{3}{2}} \cdot d\left(\frac{p_i}{p_0} \right) = -\varphi \cdot \frac{f}{V_0} \cdot \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}} \cdot dt$$

Для решения дифференциального уравнения приведем величины к безразмерному виду:

Безразмерное давление окончания процесса расширения (процесс характерный, т.е. будет определена зависимость для расширения до любого давления, относительно начального):

$$p_{2'} := 0$$

Безразмерная площадь канала

$$f := \frac{\frac{\pi \cdot D_y^2}{4}}{m^2} = 0.000079$$

Безразмерный объем емкости хранения и массы газа в ней

$$V_{0'} := \frac{V_0}{m^3} = 0.625 \quad m_{0'} := \frac{m_0}{кг} = 28.5$$

Безразмерное начальное давление в емкости хранения

$$p_{0'} := \frac{p_{0_абс}}{Па} = 86227575$$

Безразмерная начальная плотность газа в емкости хранения

$$\rho_{0'} := \frac{\rho_{Трз}(T_{OC}, p_{0_абс}, x_{H2})}{\frac{кг}{м^3}} = 45.54$$

Приведем дифференциальное уравнение к элегантному виду:

$$\frac{1}{n} \cdot \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^{\frac{1}{2n} - \frac{3}{2}} \cdot d\left(\frac{p_i}{p_0} \right) = \frac{-n \cdot f}{V_0} \cdot \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}} \cdot \varphi \left(\frac{1}{y} \cdot \frac{p_2}{p_0} \right) \cdot dt$$

В каноническом виде:

$$\frac{d}{dt}y = \frac{-n \cdot f}{V_0} \cdot \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}} \cdot \varphi\left(\frac{1}{y} \cdot \frac{p_2}{p_0}\right) \cdot y^{\frac{3}{2} - \frac{1}{2n}}$$

Сделаем замены:

$$C_1 := \frac{-n \cdot f}{V_{0'}} \cdot \sqrt{\frac{p_{0'}}{\rho_{0'}}} \quad C_2 := \frac{3}{2} - \frac{1}{2 \cdot n} \quad C_3 := \frac{p_{2'}}{p_{0'}}$$

Тогда:

$$\frac{d}{dt}y = C_1 \cdot \varphi\left(\frac{1}{y} \cdot C_3\right) \cdot y^{C_2}$$

Начальное условие: $y(0) = 1$ $y_0 := 1$

Параметры интегрирования:

$$t_{\text{render}} := 200 \quad N_{\text{points}} := 200$$

Массив производных (в данном случае первого порядка):

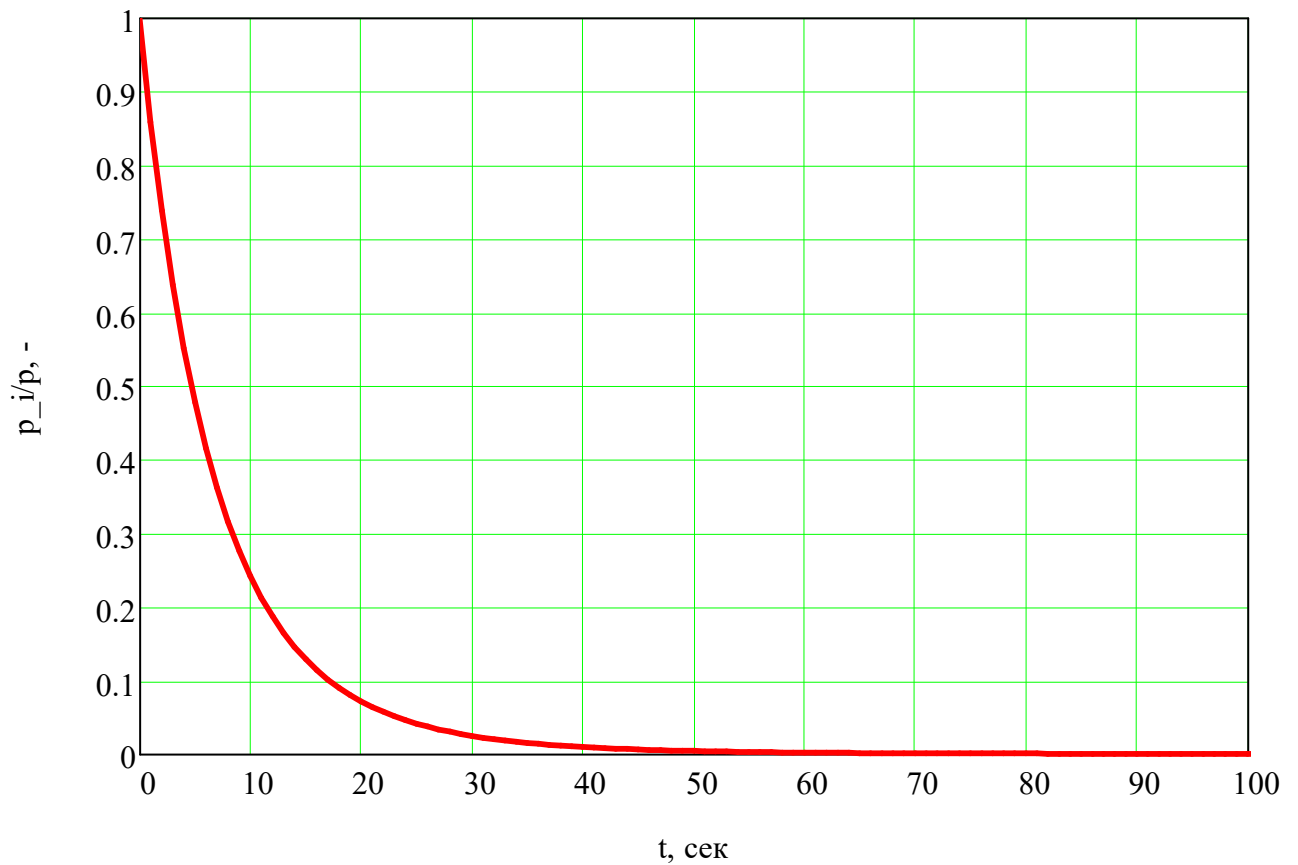
$$D(t, y) := C_1 \cdot \varphi\left(\frac{1}{y_0} \cdot C_3\right) \cdot (y_0)^{C_2}$$

Решение уравнения численным методом Рунге-Кутты 4 порядка:

$$Z := \text{rkfixed}(y, 0, t_{\text{render}}, N_{\text{points}}, D)$$

$$i := 0 \dots \text{rows}(Z) - 1$$

Для характерного процесса расширения в интервале давлений от p_0 до заданного давления решение выглядит следующим образом:



Приведем решение уравнения к рабочим условиям:

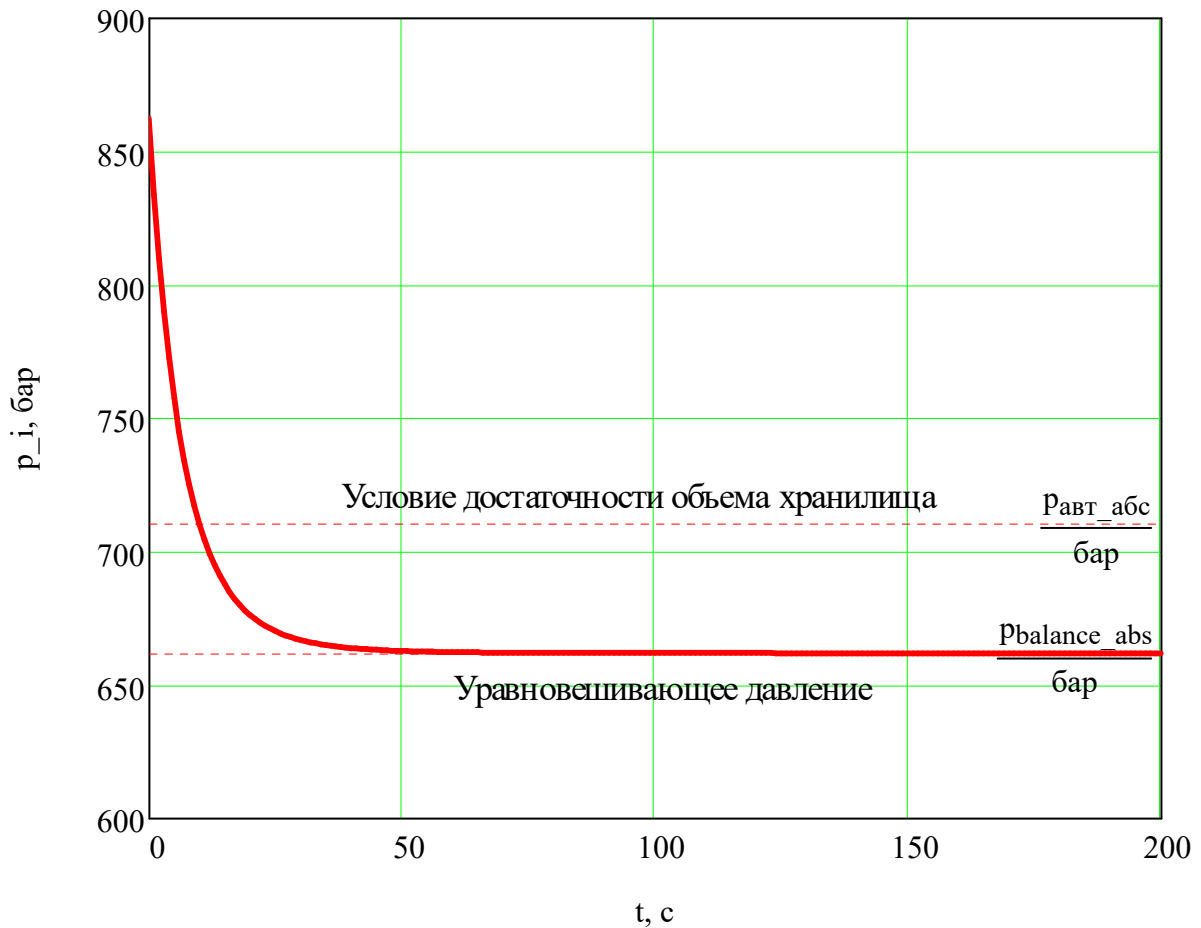
Время процесса расширения:

$$tt_i := (Z^{\langle 0 \rangle})_i \cdot c$$

Давление в процессе расширения:

$$p_{б_абс_i} := p_{balance_abs} + (p_{0_абс} - p_{balance_abs}) \cdot (Z^{\langle 1 \rangle})_i$$

Зависимость давление в емкости хранения от времени в условиях процесса:



Поскольку система связана, то через закон сохранения массы определим давление в свободном (наполняемом) объеме:

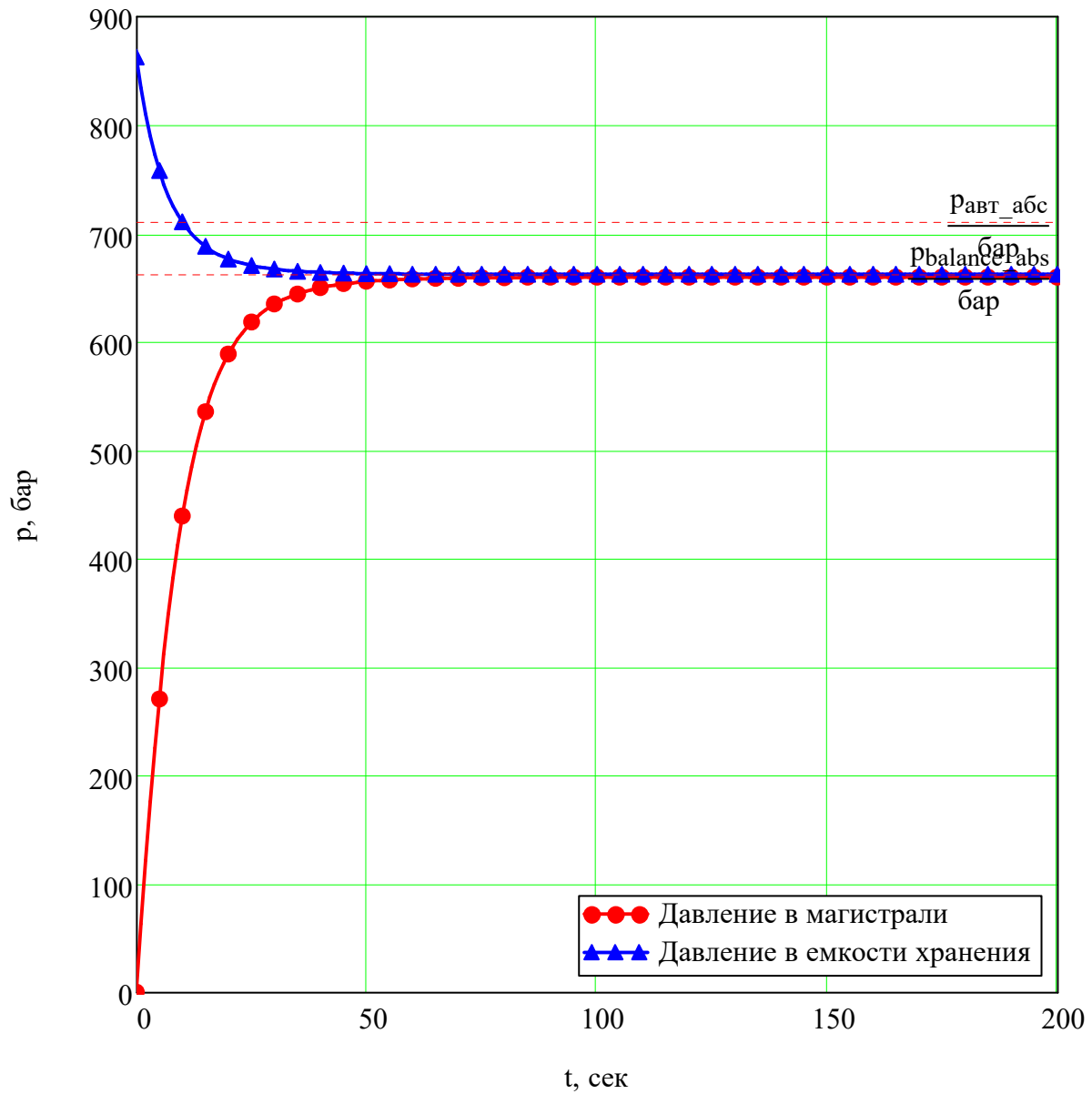
$$\text{Given} \quad p_{a.t.} := 200 \text{ бар}$$

$$\rho_{\text{Tpz}}(T_{\text{OC}}, p_{a.t.}, x_{\text{H2}}) = \frac{m_0 - V_0 \cdot \rho_{\text{Tpz}}(T_{\text{OC}}, p_i, x_{\text{H2}})}{V_{\text{free}}}$$

$$p_{2a}(p_i) := \text{Find}(p_{a.t.})$$

Значение давления в свободном (наполняемом) объеме и в емкости хранения, определенное по плотности с использованием термодинамических свойств:

$$p_{2_абс_i} := p_{2a}(p_{б_абс_i})$$



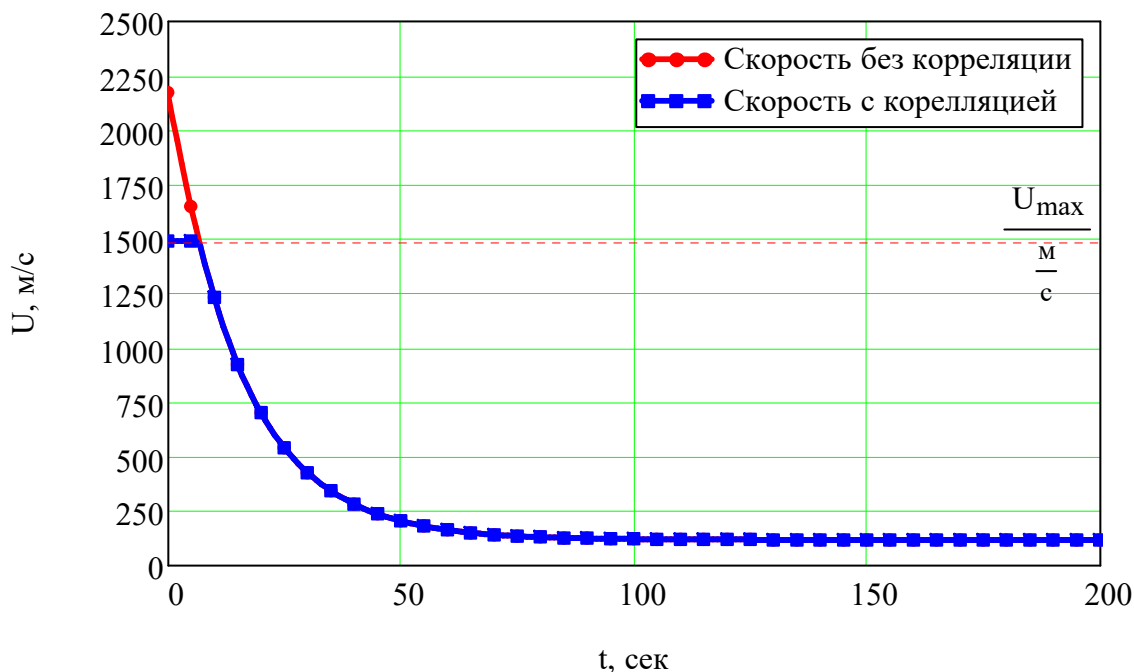
Скорость газа при расширении (без корреляции на предельную скорость):

$$U_i := \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k - 1} \cdot \left(\frac{p_{6_абс_i}}{\rho_{Tpz}(T_{OC}, p_{6_абс_i}, x_{H2})} - \frac{p_{2_абс_i}}{\rho_{Tpz}(T_{OC}, p_{2_абс_i}, x_{H2})} \right)}$$

Скорость газа при расширении (с корреляцией на предельную скорость):

$$U_{real_i} := \begin{cases} U \leftarrow \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k - 1} \cdot \left(\frac{p_{6_абс_i}}{\rho_{Tpz}(T_{OC}, p_{6_абс_i}, x_{H2})} - \frac{p_{2_абс_i}}{\rho_{Tpz}(T_{OC}, p_{2_абс_i}, x_{H2})} \right)} \\ \text{return } U \text{ if } U \leq U_{max} \\ U_{max} \text{ otherwise} \end{cases}$$

Зависимость скорости газа при истечении от времени. Максимальная скорость истечения не может превышать местную скорость звука, поскольку при прохождении газа через объем емкости хранения и ее горловины проходное сечение канала сужается (вплоть до критического), а после истечения не изменяется (для увеличения скорости требуется расширение канала за критическим сечением - сопло Лавалья).

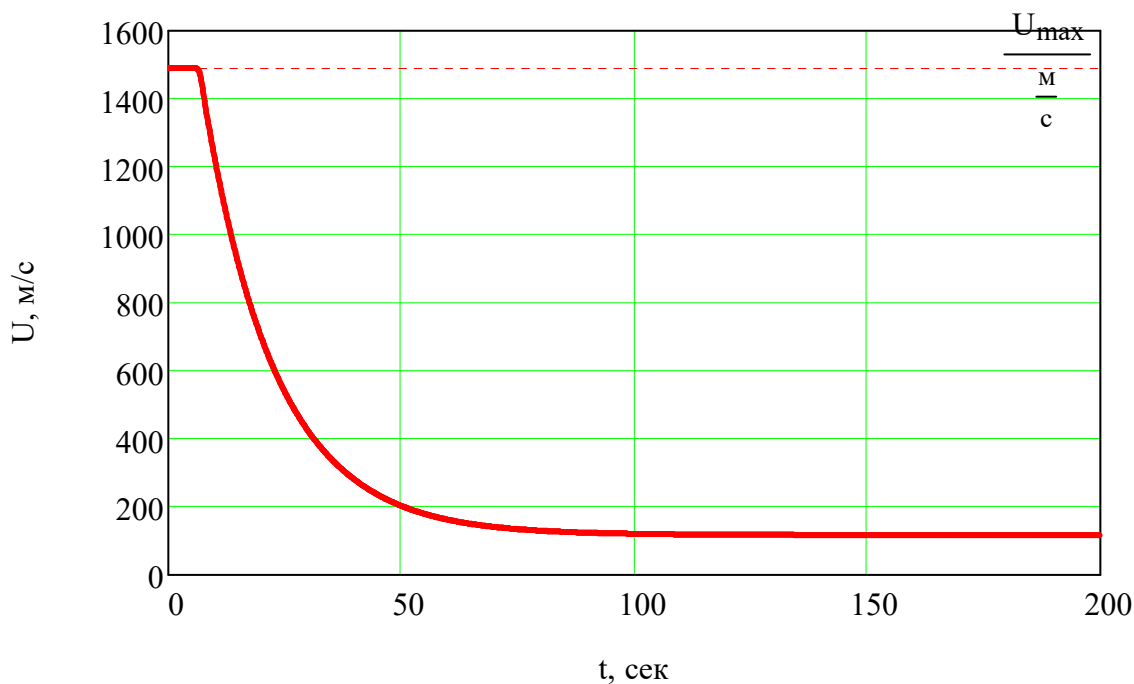


Аппроксимация зависимости скорости:

$$U_{\text{func_}} := \text{cspline}(tt, U_{\text{real}})$$

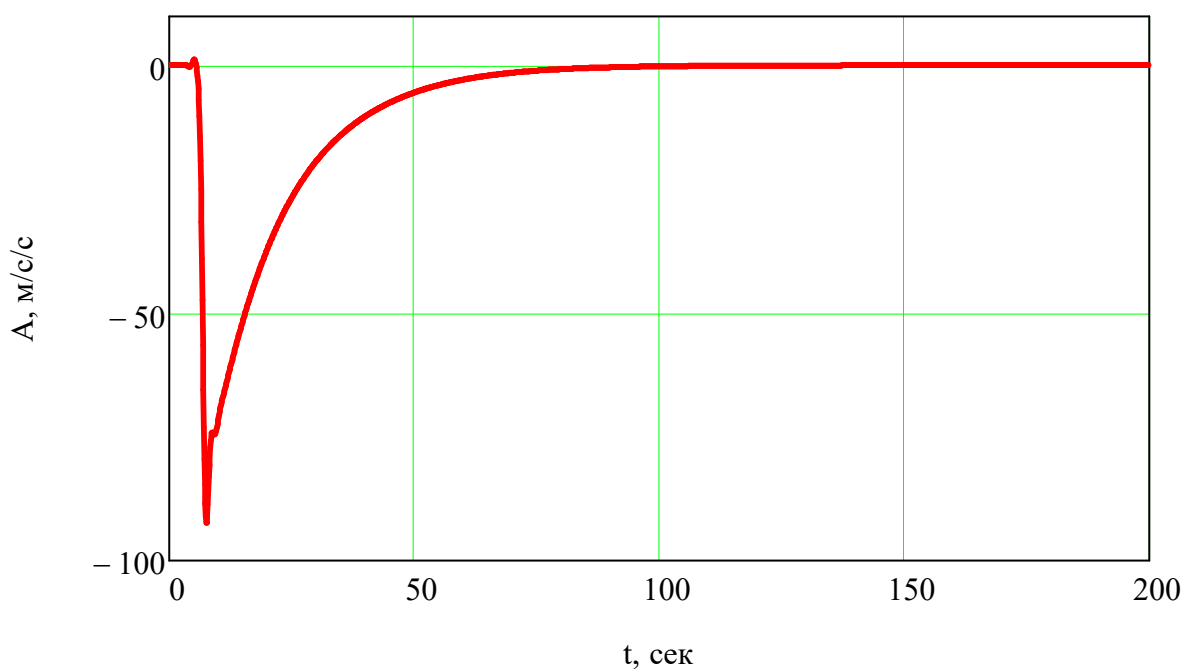
$$U_{\text{func}}(t) := \text{interp}(U_{\text{func_}}, tt, U_{\text{real}}, t)$$

$$t := 0, 0.1c \dots t_{\text{render}} \cdot c$$



Ускорение потока

$$A_{\text{func}}(t) := \frac{d}{dt} U_{\text{func}}(t)$$



Задача 1 и 3. - Время процесса расширения газа из емкости хранилища в мобильную емкость и максимальное ускорение газа при исходных данных (предельный случай, недобор по давлению до 3%):

Объем баллона автомобиля, л:	120	150
Необходимый объем емкости, л:	884	1104.2
Время процесса наполнения, сек:	70...75	90...95
Максимальное ускорение газа, м/с/с:	65	53

Задача 4. - Объем емкости хранения для достижения времени заполнения мобильной емкости 3 мин:

Объем баллона автомобиля, л:	120	150
Необходимый объем емкости, л:	6500...6600	6500...6600
Максимальное ускорение газа, м/с/с:	8.5	10

Список используемых источников

1. Шаровые краны с малым Ду. Серия 115. Ну Lok. Режим доступа: https://fluid-line.ru/assets/files/pdf/new/115_new.pdf. Дата обращения: 02.02.2022.
2. Фролов Е.С., Минайчев В.Е., Александрова А.Т. и др. Вакуумная техника: Справочник. - М.: Машиностроение, 1992. - 480 с.: ил.
3. REFPROP Documentation.NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY GUIDELINES. Режим доступа: <https://trc.nist.gov/refprop/REFPROP.PDF>. Дата обращения: 02.02.2022.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.-Л.: Гостехиздат, 1950. - 676 с.
5. Конспект лекций по дисциплине "Пневматические приводы". Режим доступа: <https://studfile.net/preview/9542378/page:3/>. Дата обращения: 03.02.2022.
6. <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-protssessov-istecheniya-szhatogo-gaza-iz-em-kosti-konechnogo-obema/viewer>