|  |  |
| --- | --- |
| Gerb-BMSTU_01 | **Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  **высшего образования**  **«Московский государственный технический университет**  **имени Н. Э. Баумана**  **(национальный исследовательский университет)»**  **(МГТУ им. Н. Э. Баумана)** |

ФАКУЛЬТЕТ «СПЕЦИАЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

КАФЕДРА «РАКЕТНЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ» (СМ-6)

**ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ:

|  |
| --- |
| Проектирование энергетических установок ракетного оружия |
|  |

НА ТЕМУ:

|  |
| --- |
| Проектирование ИДК |
|  |
|  |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил: студент группы | СМ6-92 |  |  |  | А.А. Лазарев |
|  |  | (подпись, дата) |  | (И.О. Фамилия) |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Проверил |  |  |  |  | А.А. Федоров |
|  |  |  | (подпись, дата) |  | (И.О. Фамилия) |

Москва, 2022 г.

Оглавление

[Техническое задание 3](#_Toc119582263)

[1. Формирование недостающих исходных данных 4](#_Toc119582264)

[1.1 Конструктивная схема, определение габаритов ИДК 4](#_Toc119582265)

[1.2 Определение времени работы ИДК 5](#_Toc119582266)

[1.3 Действительное значение коэффициента тяги 6](#_Toc119582267)

[1.4 Величина тяги на квазистационарном участке 7](#_Toc119582268)

[2 Выбор топлива и проектирование заряда 7](#_Toc119582269)

[2.1 Выбор топлива и расчет давлений 7](#_Toc119582270)

[2.2 Определение геометрических параметров сопла 8](#_Toc119582271)

[2.3 Расчет газодинамических параметров в выходном сечении сопла……… 9](#_Toc119582272)

[2.4 Проектирование заряда 10](#_Toc119582273)

[3 Определение массы навески воспламенителя 15](#_Toc119582274)

[4 Решение основной задачи внутренней баллистики 19](#_Toc119582275)

# Техническое задание

Спроектировать блок из  ИДК (3 ряда по 6 ИДК) для поперечной коррекции вращающегося ЛА калибром  мм. Количество импульсов  (по 3 ДУ),  (6 по 2 ДУ + 6 по 1 ДУ) или  (по 1 ДУ). Суммарный импульс коррекции не менее  Н·с при телесном угле коррекции . Частота вращения ЛА  об/с, скорость полета в момент коррекции  м/с (сверхзвуковая скорость полета). Время выхода двигателя на режим не более  мc. Максимальная масса одного ИДК не более  кг. Диапазон рабочих температур 

# Формирование недостающих исходных данных

## Конструктивная схема, определение габаритов ИДК

Конструктивная схема расположения ИДК в корпусе ЛА дана по условию (рис. 1.1). ИДК расположены радиально (3 ряда по 6 ИДК), сопла расположены под углом в  к оси *Y* ЛА.



Рис. 1.1. Конструктивная схема ИДК

Примем внешний диаметр корпуса ИДК  мм, минимальный зазор между ИДК  мм. Тогда максимальная длина цилиндрической части корпуса и соплового блока



Путем нескольких итераций установлено, что для размещения заряда в корпус необходимо использовать сферическое заднее днище. Чтобы сохранить зазор между ИДК, графически было определено, что максимальную длину  необходимо уменьшить на 4 мм. Тогда .

Предварительная прорисовка расположения ИДК представлена на рис. 1.2.

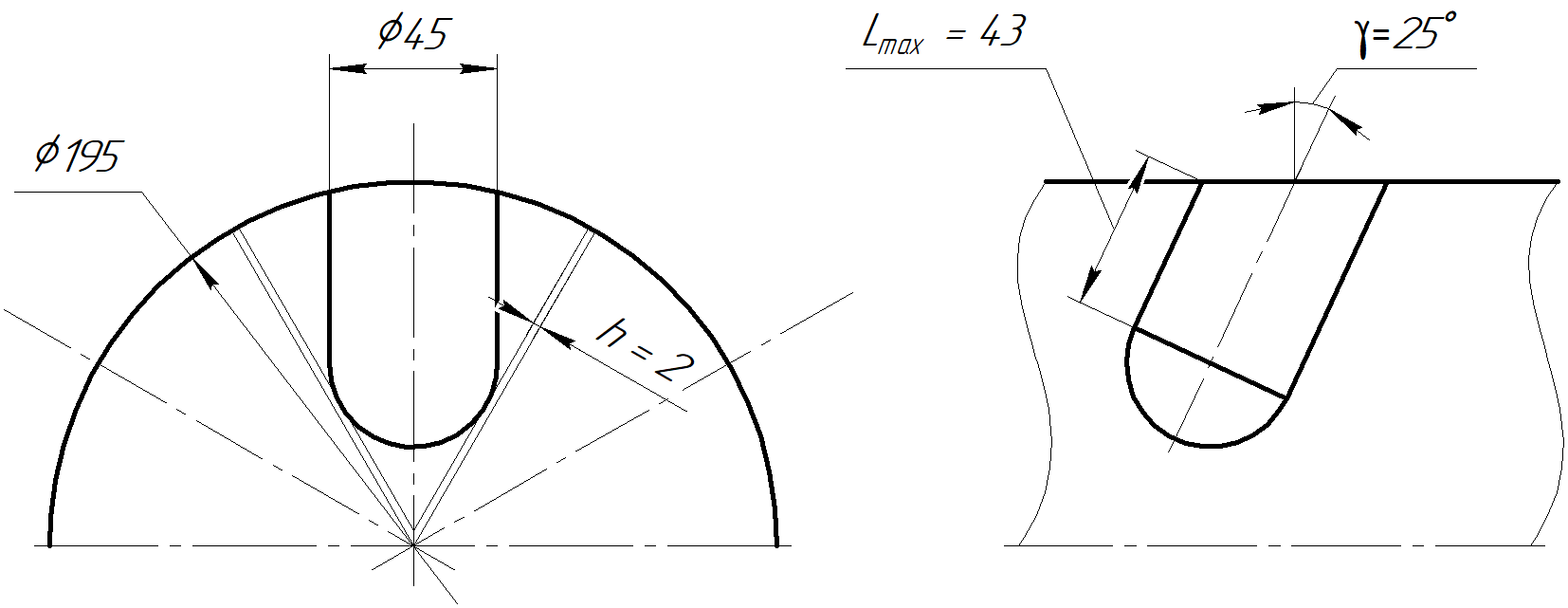


Рис. 1.2. Предварительная прорисовка

Предварительно назначим максимальное давление в камере . Тогда толщина стенки



где  – коэффициент безопасности;  МПа – предел прочности материала стенки (30ХГСА).

Внутренний диаметр КС



## Определение времени работы ИДК

Время коррекции (работы ИДК) для вращающегося ЛА определяется по формуле:

 c,

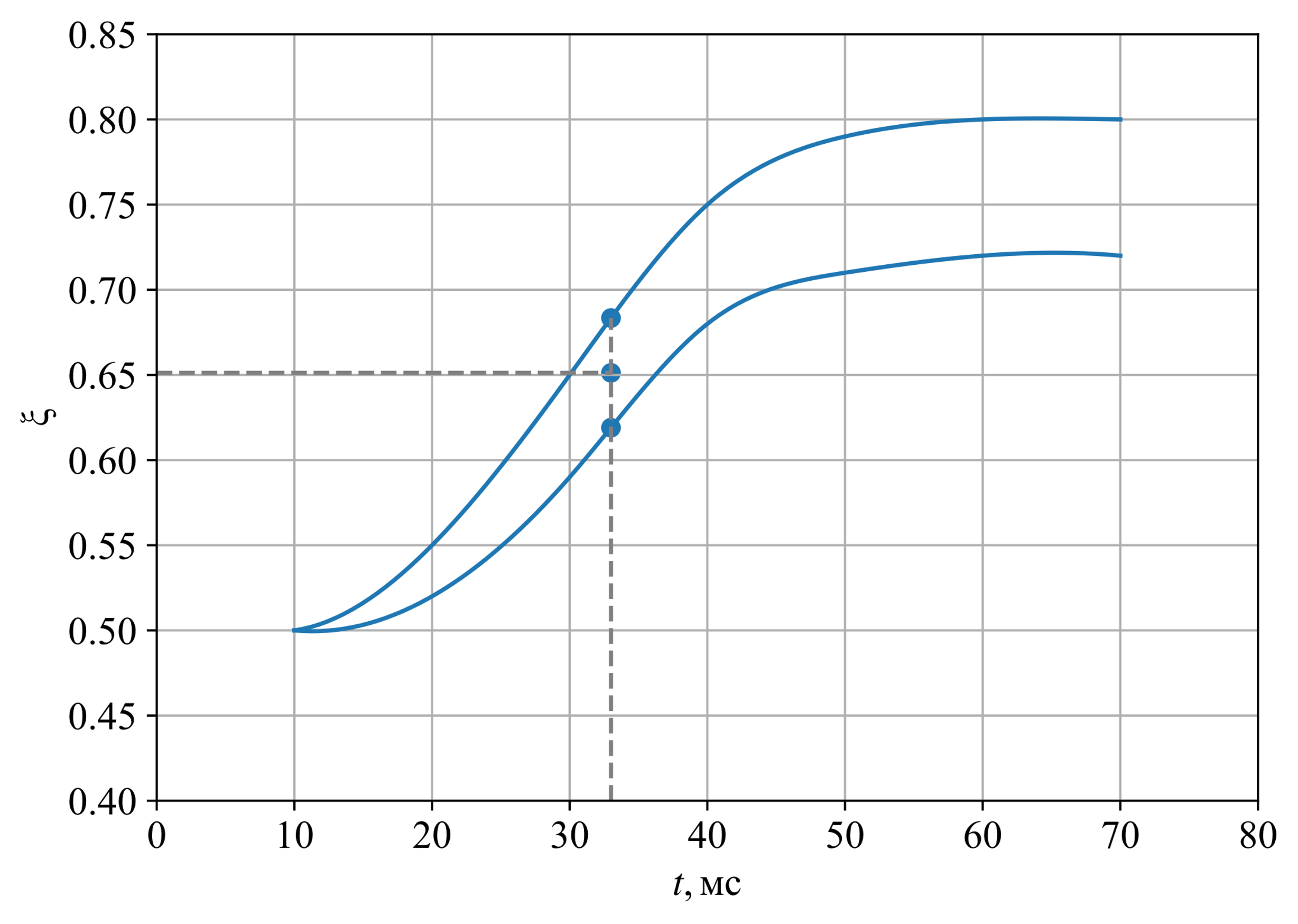
 с.

Принимаем для дальнейших расчетов  c.

Время горения заряда (в первом приближении)

,

где  с – время выхода на режим,  - коэффициент заполнения индикаторной кривой давления ИДК, который выбирается в соответствии с рис. 2.



По рис. 2 принимаем . Отсюда время горения заряда

 с.

Время последействия тяги

 c.

## Действительное значение коэффициента тяги

Назначаем коэффициент расширения сопла . Тогда теоретический коэффициент тяги согласно таблице 1.1 .

Таблица 1.1. Значения  и соответствующий им

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,6 |
|  | 1,46 | 1,51 | 1,56 | 1,6 | 1,62 | 1,64 | 1,67 |

Дополнительные потери на тепло и скорость учитываются введением коэффициентов  и  соответственно.

Действительное значение коэффициента тяги



## Величина тяги на квазистационарном участке

Необходимая тяга на квазистационарном участке



где  (телесный угол ),  (скорость ЛА  м/с или ). Подставляя значения, получаем



Так как коррекция поперечная, а вектор тяги наклонен под углом  ИДК должен развивать тягу больше потребной



# Выбор топлива и проектирование заряда

## Выбор топлива и расчет давлений

Из приведенного в условии домашнего задания банка топлив все решения с топливами П-1, П-3 и Б-1, Б-2 не подходили из-за низкого коэффициента заполнения камеры сгорания и большой длины заряда. Решений с топливом П-2 не было найдено из-за неустойчивого процесса горения. Поэтому приведенные ниже расчеты справедливы для топлива Б-3, так как для него было найдено решение. Параметры топлива приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Характеристики топлива Б-3

|  |  |
| --- | --- |
| Показатель | Значение |
| Плотность , кг/м3 | 1640 |
| Сила пороха , МДж/кг | 1,04 |
| Газовая постоянная , Дж/(кг·К) | 338 |
| Температура торможения , К | 3080 |
| Показатель адиабаты | 1,25 |
| Единичный импульс , м/с | 2300 |
| Термохимическая константа , К | 370 |
| Скорость горения , м/с  (*p* в МПа) | 0,00085 · (9,81*p*)0,69  (16 < *p* < 150) |

Из уравнения Бори по значению максимального давления определим минимальное  и номинальные  давления в камере:



где  – зависимость скорости горения от давления, где  – температурная зависимость скорости горения топлива

.

Из системы уравнений получаем  МПа и  МПа.

## Определение геометрических параметров сопла

Площадь критического сечения сопла



Отсюда определим диаметр критического сечения сопла:



Для ИДК в большинстве случаев сопло коническое с прямолинейными образующими. Примем угол входной части  и угол наклона образующей сопла к его оси .

Длины участков сопла:







Итого, длина соплового блока



Тогда допустимая длина заряда



## Расчет газодинамических параметров в выходном сечении сопла

Безразмерная скорость потока определяется из газодинамической функции  при заданном коэффициенте расширения сопла 

.

Численно решая уравнение, находим значение безразмерной скорости потока в выходном сечении .

Критическая скорость звука



Скорость звука в выходном сечении



Давление в выходном сечении сопла



Температура в выходном сечении сопла



Плотность потока в выходном сечении сопла



## Проектирование заряда

Проектирование заряда сводится к выбору топлива и формы заряда, определению параметров заряжания двигателя, а также расчету всех его геометрических размеров, параметров и характеристик. Форма заряда должна обеспечивать максимальное заполнение корпуса двигателя при условии допустимых скоростей газового потока, омывающего заряд. Считается, что коэффициент заполнения поперечного сечения КС .

Для импульсных ракетных двигателей чаще всего используют вкладные трубчатые заряды.

Заряд ИДК является трубчатым многошашечным. Наибольшая плотность укладки шашек определяется формулой

,

где *m* – модуль, целое число шашек, укладывающие по диаметру камеры.

Постоянная расхода



Расход газов через сопло



где  – коэффициент расхода сопла.

Запас топлива



Для выполнения коррекции траектории ИДК должен сработать за время не более . Следовательно, для выполнения этого условия проектирование заряда необходимо вести для минимальной температуры окружающей среды



Потребная площадь горения



Так как не существует аналитического решения по определению значения параметров , , , , то будем последовательно задавать количество пороховых элементов и рассчитывать необходимые геометрические размеры. Критерием оценки оптимальности того или иного варианта является максимум коэффициента заполнения поперечного сечения (минимум массы конструкции) при заданных ограничениях:

* значения параметров Победоносцева для внешней и внутренней поверхностей не должны превышать ;
* значение критерия Шварца не должно превышать 0,75.
* длина заряда не должна превышать предельно допустимого значения .

Наружный диаметр заряда находится по формуле:

,

где dz = 1 мм – зазор между стенкой и зарядом, вводится для уменьшения значения параметра Победоносцева по наружной стенке или учета зазора для теплового расширения заряда.

Внутренний диаметр заряда определяется как

.

Длина заряда определяется из потребной площади горения

.

Значения параметров Победоносцева для внешней и внутренней поверхности:





Коэффициент заполнения поперечного сечения

.

Критерий Шварца



Результаты вычислений приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Результаты вычислений параметров заряжания

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *m* | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 |
| *n* | 7 | 19 | 37 | 61 | 91 |
| *,* мм | 13,1 | 7,9 | 5,6 | 4,4 | 3,6 |
| *,* мм | 10,3 | 5,1 | 2,8 | 1,6 | 0,8 |
| *,* мм | 87,0 | 58,0 | 45,0 | 39,0 | 36,0 |
|  | 33,51 | 45,47 | 64,26 | 99,23 | 183,2 |
|  | 74,94 | 76,45 | 82,29 | 90,28 | 100,47 |
|  | 0,282 | 0,422 | 0,537 | 0,623 | 0,681 |
|  | 0,172 | 0,214 | 0,267 | 0,328 | 0,387 |

По результатам расчетов ни одно решение по ограничению по длине заряда не подходит. Выберем вариант с  и подберем длины трубок так, чтобы их суммарная площадь горения была равна потребной. Также для размещения воспламенителя 7 трубок будет убрано.

Примем для первого ряда с  длину заряда , для второго с  –  и для последнего с  – .

Площади горения каждого ряда:







Суммарная площадь горения совпала с потребной



Размещение заряда в КС приведен на рис. 2.1.

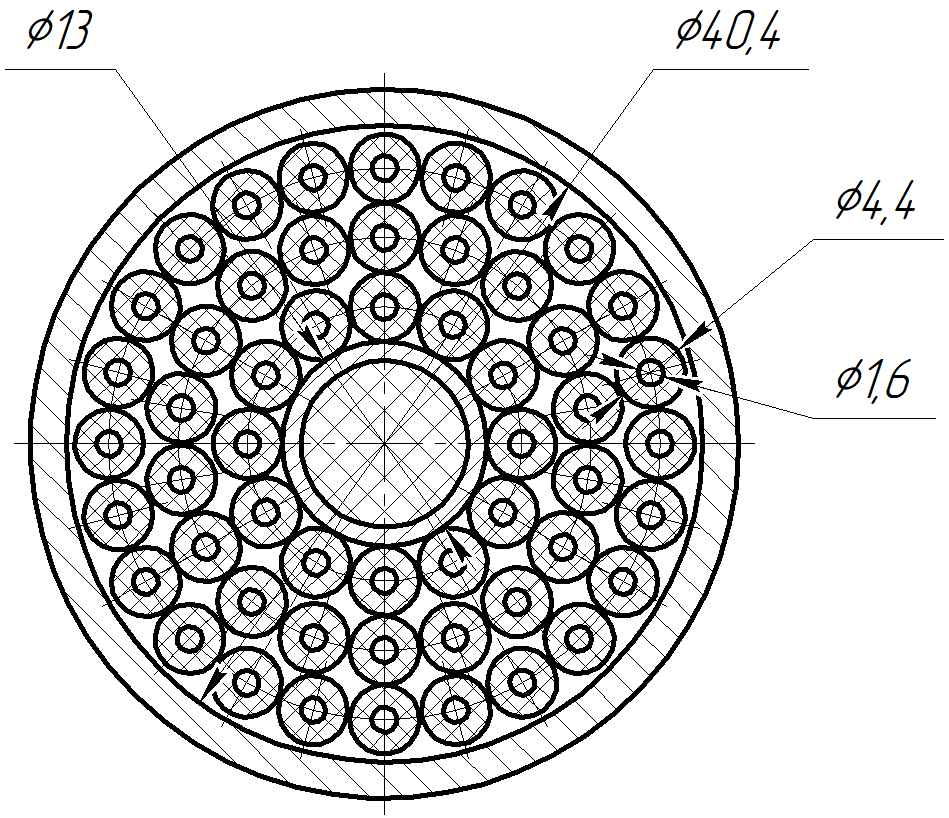


Рис. 2.1. Размещение заряда в КС

Закон горения многошашечного вкладного заряда в нашем случае выглядит следующим образом



Закон горения заряда приведен на рис. 2.2.

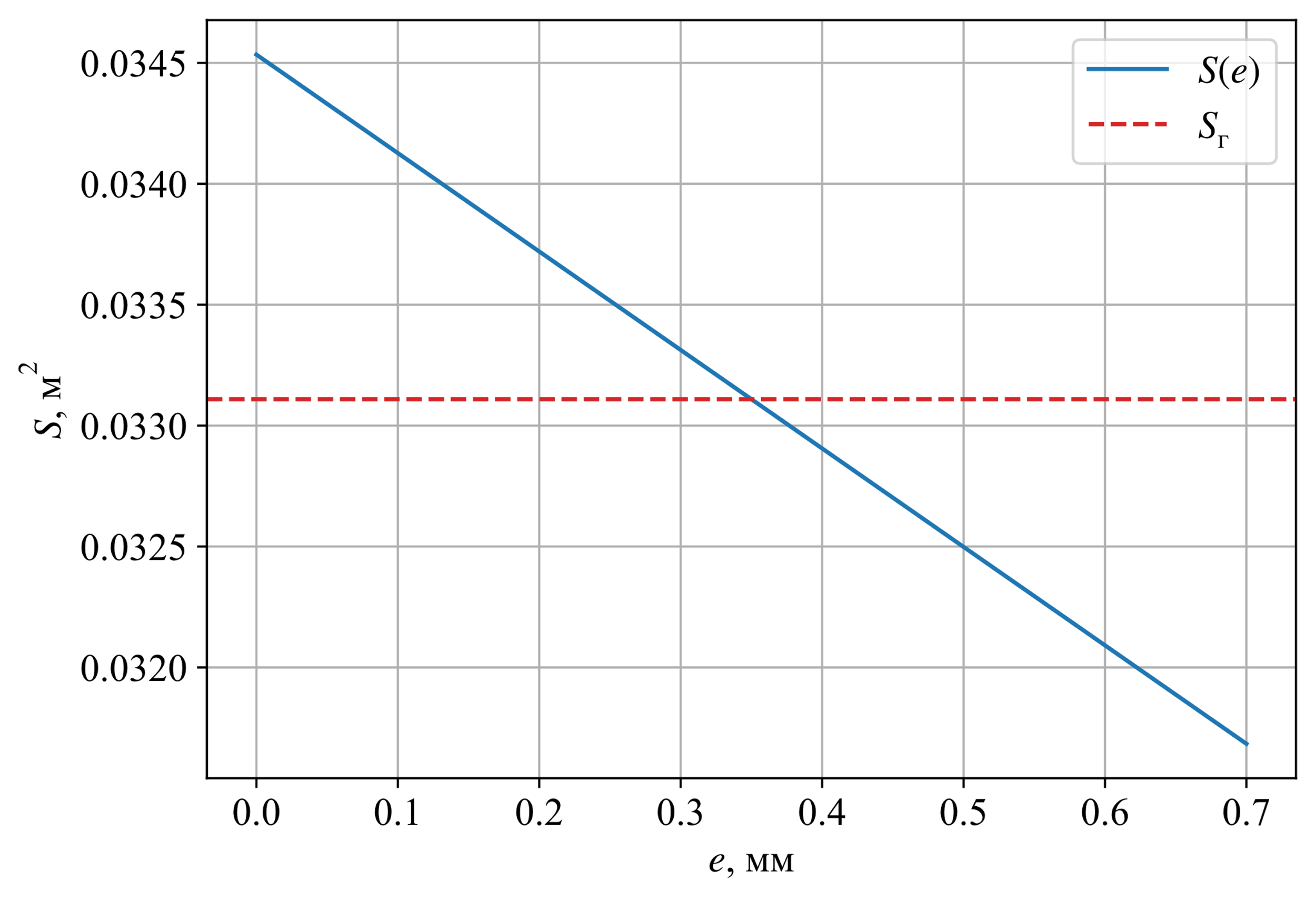


Рис. 2.2. Закон горения заряда

# Определение массы навески воспламенителя

Рациональной массой воспламенителя является такая масса , при которой обеспечивается гарантированное воспламенение топлива во всем диапазоне начальных температур  заряда. Если воспламенителя недостаточно – существует опасность отсутствия воспламенения заряда.

При выборе воспламенителя рассматривается наиболее неблагоприятная ситуация при минимальной начальной температуре. При такой начальной температуре наблюдается затянутый процесс горения, выражающийся в недостаточном газоприходе.

Для марок воспламенителей, используемых на практике, можно считать, что скорость горения воспламенителя  не зависит от давления и составляет 0,05 м/с.

Принимается, что площадь горения поверхности воспламенения изменяется во времени *t* по следующему закону



где  – начальная площадь горения воспламенителя, *m* – показатель дегрессивности горения воспламенителя,  – время горения воспламенителя,  – толщина горящего свода.

Давление вспышки

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.1) |

где  – удельная теплоемкость топлива,  – скорость горения топлива,  – минимальное давление устойчивого горения топлива,  – газовая постоянная воспламенителя,  – температура вспышки топлива,  – начальная температура топлива,  – температура продуктов сгорания воспламенителя в момент вспышки топлива

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.2) |

Уравнение, описывающее изменение давления в камере за счет автономного горения воспламенителя



где коэффициенты  и :





где  – калорийность воспламенителя,  – начальная площадь горения воспламенителя,  – начальный свободный объем камеры сгорания двигателя



Площадь охлаждаемой поверхности



Максимальное давление воспламенителя

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Начальная площадь поверхности горения воспламенителя

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.3) |

Для надежного воспламенения при температуре  давление  необходимо выбирать из условия



где  – давление вспышки основного заряда при температуре окружающей среды .

Масса навески воспламенителя определяется по следующей формуле

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3.4) |

Параметры воспламенителя приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Параметры воспламенителя

|  |  |
| --- | --- |
| Показатель | Значение |
| Теплота сгорания , кДж/кг | 3050 |
| Скорость горения , м/с | 0,05 |
| Показатель адиабаты | 1,25 |
| Плотность | 1700 |
| Показатель дегрессивности | 3 |
| Толщина горящего свода зерна воспламенителя , мм | 2 |

Температура продуктов сгорания воспламенителя в момент вспышки основного заряда определяется по формуле (3.2)



Давление вспышки основного заряда при температуре  по формуле (3.1)



а максимальное давление воспламенителя



Кривая автономного горения воспламенителя представлена на рис. 3.1.

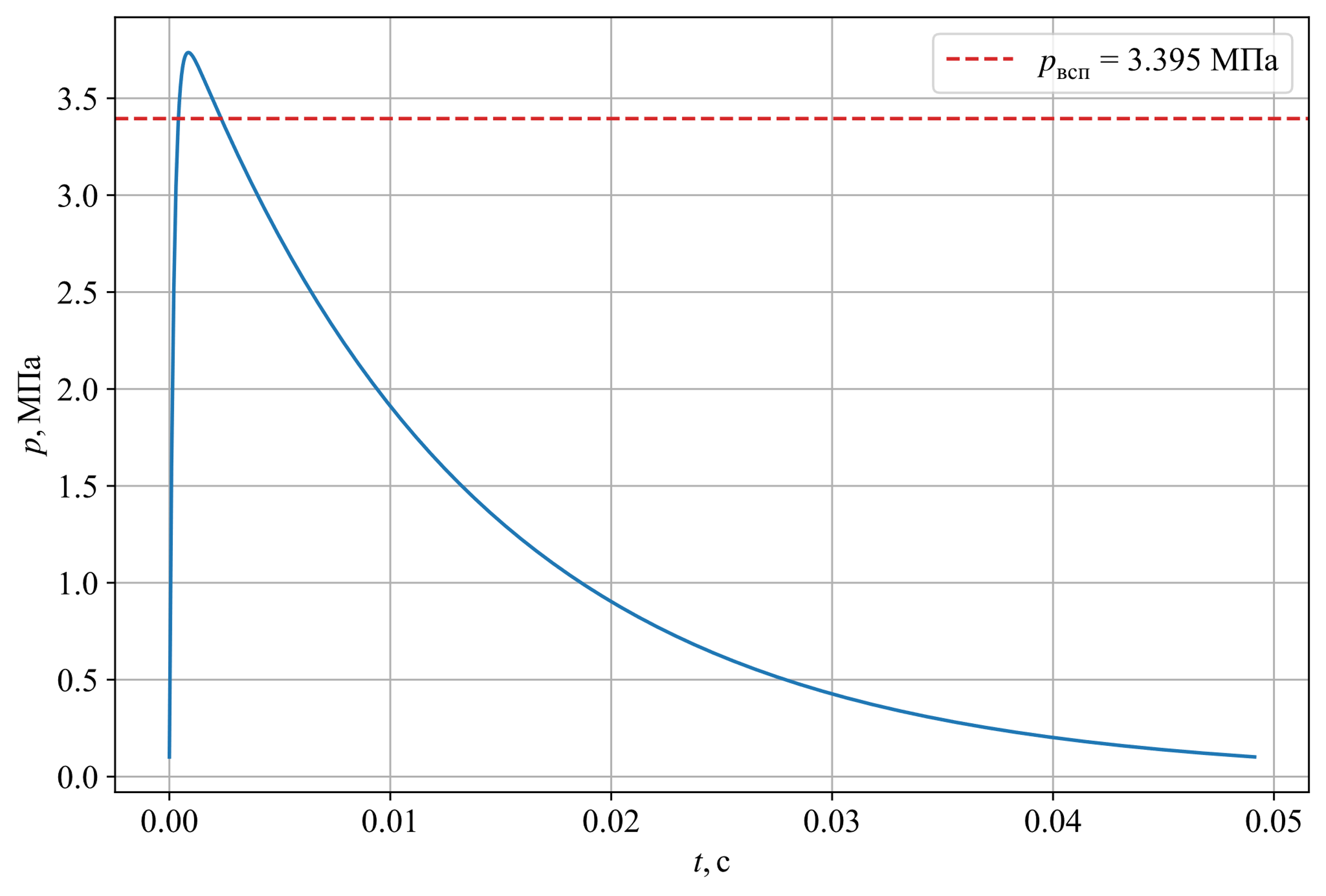


Рис. 3.1. Кривая автономного горения воспламенителя

Начальная площадь поверхности горения воспламенителя согласно формуле (3.3) , масса навески воспламенителя по (3.4) составляет 

Длина навески воспламенителя



где  – внутренний диаметр ФВУ, 1,2 мм – толщина стенки перфорированной трубки.

# Решение основной задачи внутренней баллистики

Система дифференциальных уравнений внутренней баллистики имеет следующий вид:



Скорость горения основного заряда



Газоприходы основного заряда и воспламенителя определяются по формулам:





Параметры ,  и  являются функциями Хэвисайда и отвечают за следующее. Функция  отвечает за момент вспышки основного заряда



Функция  отвечает за горение основного заряда



И, наконец, функция  отвечает за горение воспламенителя



Интегрирование системы ДУ проводится при следующих начальных условиях:



Система уравнений интегрируется с шагом  с.

Индикаторные кривые давлений при трех температурах ,  и  приведены на рис. 5.1 и 5.2.

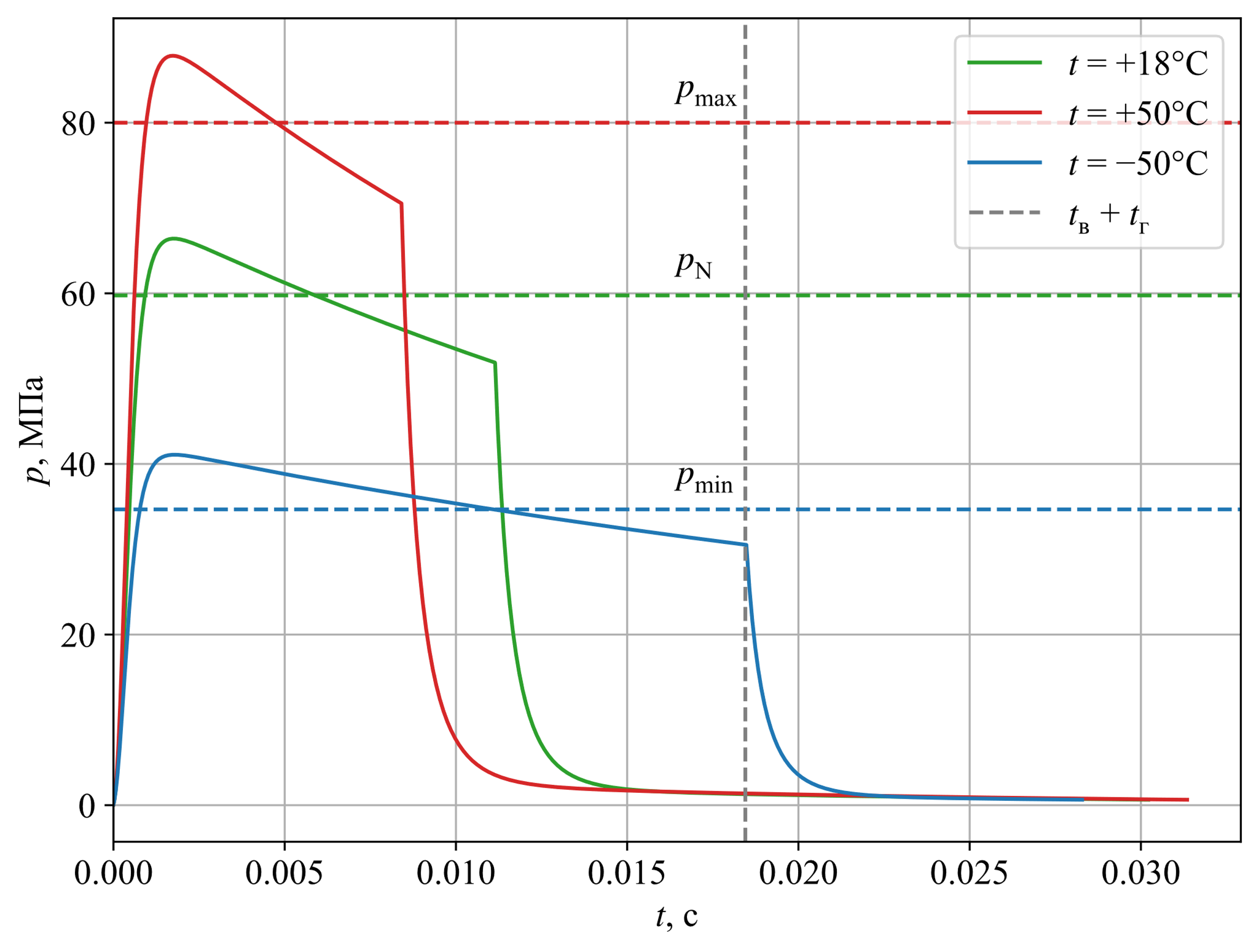


Рис. 4.1. Индикаторные кривые давлений при трех температурах

Тяга определяется по следующей формуле



где  – площадь выходного сечения



Тяга двигателя при трех начальных температурах приведена на рис. 4.2.

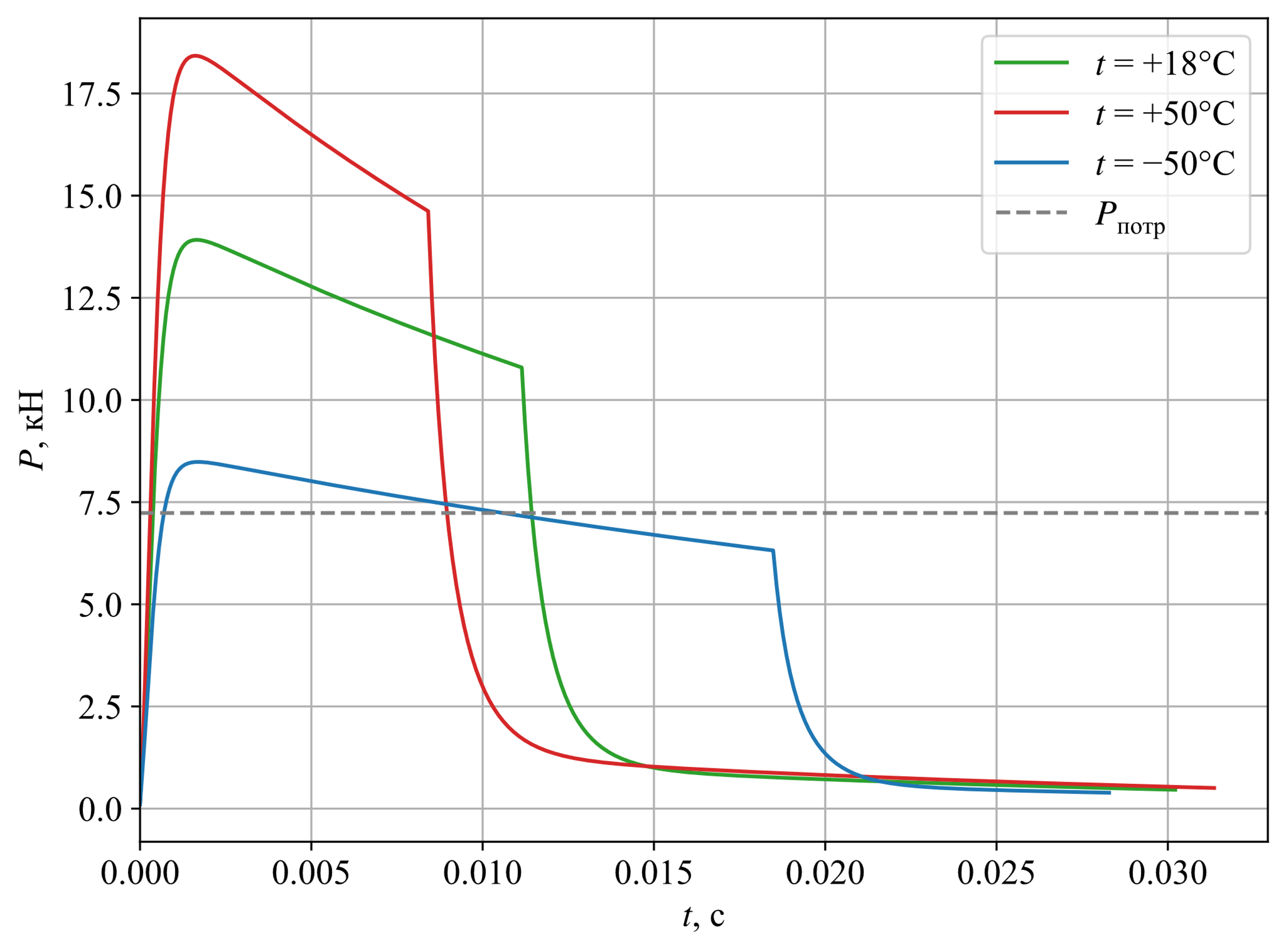


Рис. 4.2. Тяга двигателя при трех начальных температурах

Суммарный импульс ИДК определяется как



Результаты расчета суммарных импульсов для трех температур приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Результаты расчета суммарных импульсов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | –50 | +18 | +50 |
|  | 143,30 | 155,07 | 162,31 |

Из рис. 4.1 и таблицы 4.1 видно, что двигательная установка обеспечивает создание удельного импульса более 140 Н ∙ с.