

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование)

13.04.03 Энергетическое машиностроение
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Водородная энергетика и декарбонизация в энергетических системах
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему **Эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель
с прогрессивной тяговой характеристикой**

Обучающийся

К.А. Сиденко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, Д.А. Павлов

(ученая степень, ученое звание, И.О. Фамилия)

Содержание

Введение.....	3
1 Состояние вопроса. Конструкции ПуВРД.....	8
1.1 ПуВРД конструкции Марконне	8
1.2 ПуВРД конструкции Шуберта	8
1.3 ПуВРД Argus As 109-014	9
1.4 ПуВРД с аэродинамическими клапанами	28
1.5 ПуВРД Escopette 3340	30
1.6 ПуВРД конструкции Кентфилда	31
1.7 ПуВРД «Мессершмитт»	33
1.8 Капотированные ПуВРД.....	34
1.9 ПуВРД с боковым впускным трактом	36
1.10 ПуВРД с задним впускным трактом	38
1.11 ПуВРД U-образной конфигурации	41
2 Стендовые испытания ЭПуВРД	44
2.1 Порядок проведения испытаний	44
2.2 Измерительное оборудование	46
2.3 Анализ результатов испытаний.....	50
3 Численные газодинамические расчеты при отсутствии теплоподвода.....	54
4 Аналитические расчеты с использованием метода электроакустических аналогий	58
5 Численные газодинамические расчеты при наличии теплоподвода	62
Заключение	67
Список используемой литературы	69

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты широко используются в различных сферах деятельности. Перспективное направление развития беспилотной авиации – разработка эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя простой конструкции, обусловленной отсутствием подвижных деталей, низкозатратного в производстве [14, 22]. Преимуществом данной конструкции является прогрессивная тяговая характеристика, когда с увеличением скорости набегающего потока увеличивается наполнение воздухом камеры сгорания, и, как следствие, тяга двигателя возрастает [16-21].

Пульсирующее горение – горение, характеризующееся колебательной составляющей. В литературе такое горение также называют вибрационным и пульсационным. В области пульсирующего горения наблюдаются изменения давления, скорости течения и других параметров газа в соответствии с законом, близким к гармоническому.

Пульсирующий воздушно-реактивный двигатель (ПуВРД) представляют собой силовую установку, реализующую пульсирующее горение в качестве рабочего процесса. Существует множество различных конфигураций ПуВРД, которые можно упрощенно классифицировать следующим образом:

а) наличие эжекторов и их расположение:

жекторные:

- эжектор во впусканом тракте,
- эжектор в выпускном тракте,
- эжекторы во впусканом и выпускном трактах;

езэжекторные;

б) наличие клапана во впусканом тракте и его тип:

лапанные:

- механический клапан,

– аэродинамический клапан;

есклапанные;

в) расположение впускного тракта:

передний впускной тракт,

адний впускной тракт (включая U-образные ПуВРД),

оковой впускной тракт (Т-образные ПуВРД);

г) расположение впрыска топлива:

пускной тракт,

амера сгорания,

мешанный впрыск;

д) поддерживаемый режим горения:

ефлаграционный,

етонационный.

На рисунках 1, 2 показана схема упрощенной классификации ПуВРД.

Пульсирующие воздушно-реактивные двигатели



Рисунок 1 – Схема упрощенной классификации ПуВРД



Рисунок 2 – Схема упрощенной классификации ПуВРД (продолжение)

Необходимо отметить, что в литературе ПуВРД без механических клапанов часто называют бесклапанными, даже если они обладают аэродинамическими клапанами. В данной работе бесклапанными называются все ПуВРД, не имеющие каких-либо устройств, основным назначением которых является организация одностороннего движения потока газов.

Проблема создания реактивных двигателей, использующих цикл с

подводом тепла при постоянном объеме (цикл Гемфри), давно является объектом внимания исследователей в области двигателестроения. В цикле Гемфри при незначительном предварительном сжатии топливовоздушной смеси перед ее подачей в камеру сгорания повышается давление в процессе сгорания топлива. Однако результаты проведенных к настоящему времени экспериментальных и теоретических исследований рабочих процессов в эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе разрознены, что затрудняет разработку критериев оценки эффективности работы эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя. Не существует единого мнения о механизме рабочего процесса в эжекторном пульсирующем

в

о Цель исследования – определение источников автоколебаний в эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе.

д Объектом исследования является разработка ООО НПФ «РОТОР» – бесклапанный эжекторный пульсирующий воздушно реактивный двигатель, выпускные трубы которого направлены навстречу потоку.

н Предметом исследования являются источники автоколебаний,
и

м Результаты работы могут быть использованы для построения математических моделей рабочего процесса с целью разработки наиболее оптимальных конструкций двигателей с заданными расходом и типом топлива, изменением тяги, габаритными ограничениями.

и Диссертация состоит из введения, разделов, заключения, списка литературы. Работа изложена на 65 страницах основного текста, иллюстрированного 47 рисунками, 5 таблицами, 30 источниками (в том числе 5 иностранными).

н

в

м

ж

д

к

и

остояние вопроса. Конструкции ПуВРД

уВРД конструкции Марконне

В 1909 году Жорж Марконне первым предложил использовать пульсирующее горение для реактивного движения самолетов [30]. Его конфигурация ПуВРД показана на рисунке 3. В устройстве Марконне поддерживалось пульсирующее горение без использования механических клапанов.

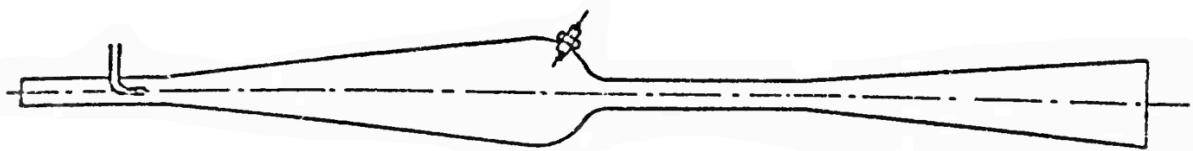


Рисунок 3 – ПуВРД конструкции Марконне

Марконне полагал, что гидравлическое сопротивление для продуктов горения будет наименьшим со стороны тракта выпуска по сравнению с впускным трактом, что должно было обеспечиваться с помощью длинного диффузора между воздухозаборником и камерой сгорания. Двигателю Марконне для работы требовалась принудительная подача воздуха на впуске. В камере сгорания отсутствуют элементы, способствующие турбулизации потока, что ухудшает условия смесеобразования и повышает неполноту сгорания топлива, снижается тяга двигателя.

уВРД конструкции Шуберта

В 1944 году Уильям Шуберт предложил свою конструкцию бесклапанного ПуВРД, конфигурация которого показана на рисунке 4.

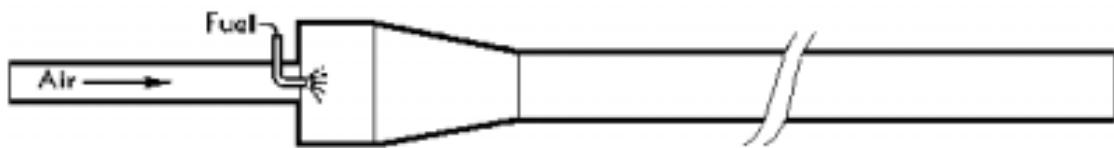


Рисунок 4 – ПуВРД конструкции Шуберта

Конструкция Шуберта имеет некоторые значительные отличия от конструкции Марконне. Во-первых, резкий переход между впускной трубой и камерой сгорания обеспечивает сильную турбулентность потока, способствующую смесеобразованию, и, соответственно, более полному сгоранию топлива. Во-вторых, параметры впускной трубы были определены таким образом, чтобы её сопротивление исходящему горячему газу было значительно выше, чем входящему холодному воздуху. Тем не менее, часть продуктов горения покидала двигатель через впускную трубу. Впускная труба, достаточно длинная, чтобы полностью предотвратить выброс продуктов горения, ухудшит наполнение камеры сгорания, тем самым снизит тягу ПуВРД.

ПуВРД Argus As 109-014

Немецкий ПуВРД Argus As 109-014, применявшийся в качестве силовой установки на самолётах-снарядах Fieseler Fi 103 (V-1) (рисунок 5), является единственным ПуВРД, который производился крупносерийно и доказал практическую значимость двигателей данного класса [27].

FLYING BOMB

F.Z.G. 76

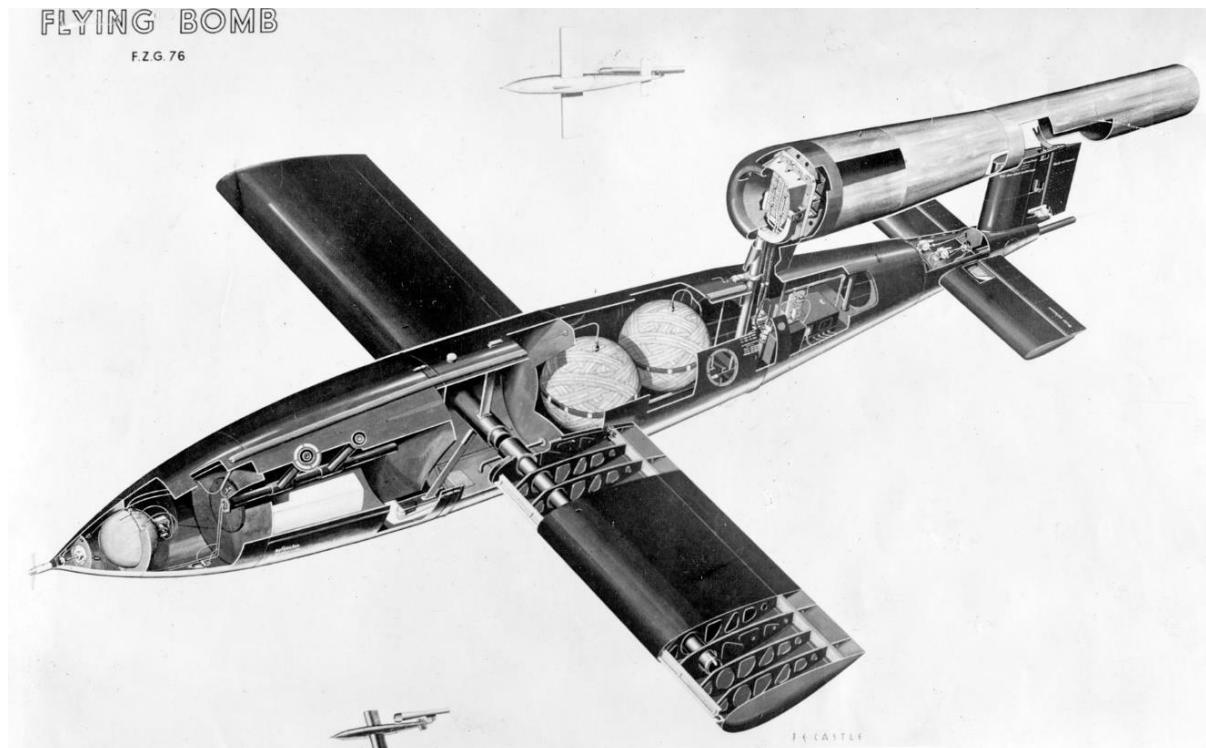


Рисунок 5 – Самолёт-снаряд Fieseler Fi 103 (V-1) с ПуВРД Argus As 109-014

Двигатель состоит из следующих основных частей: воздухозаборник, клапанная решётка, пусковые воздухопроводы, топливопроводы с жиклёрами, диффузорная крышка, камера сгорания, резонаторная труба (рисунки 6, 7).

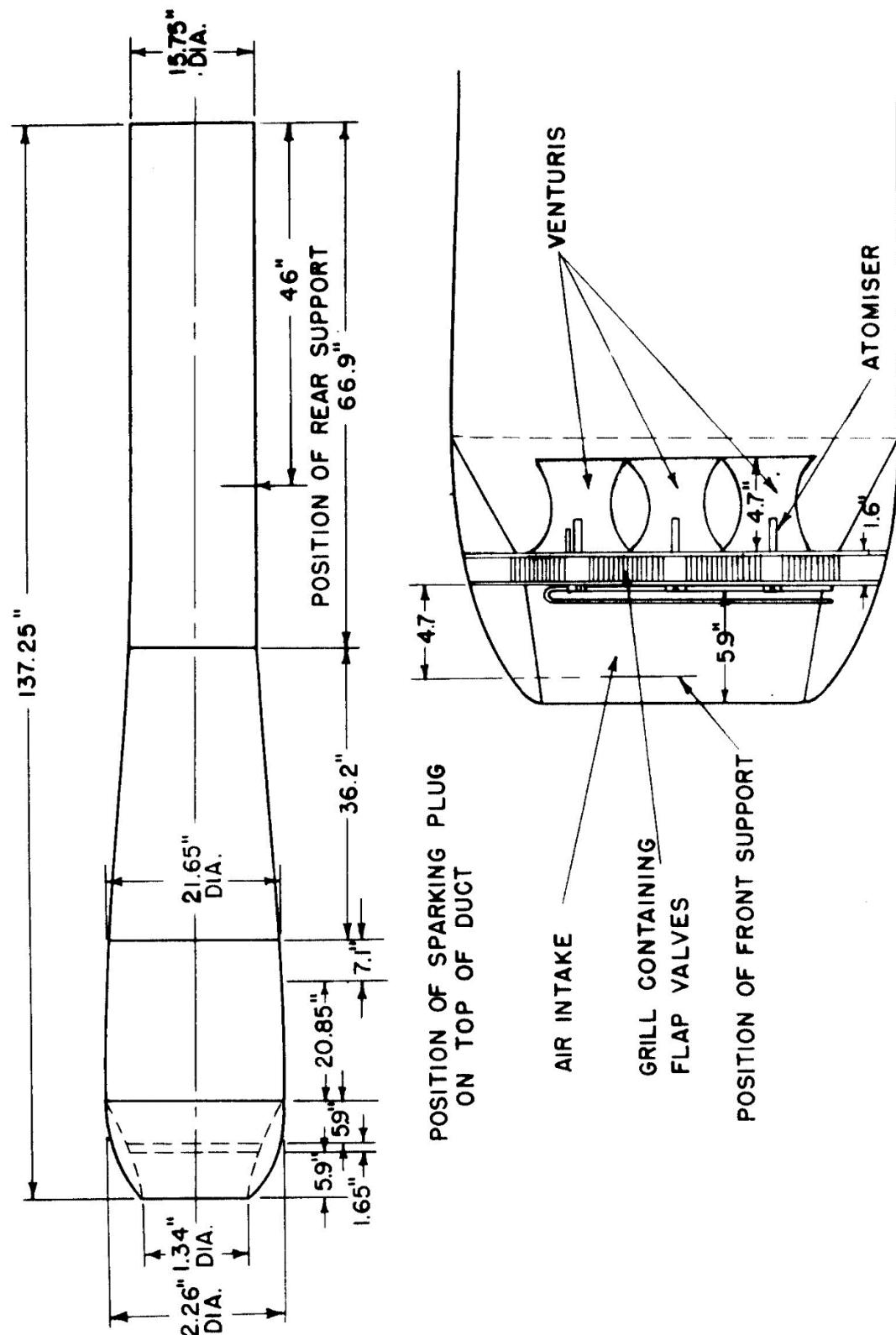


Рисунок 6 – ПуВРД Argus As 109-014

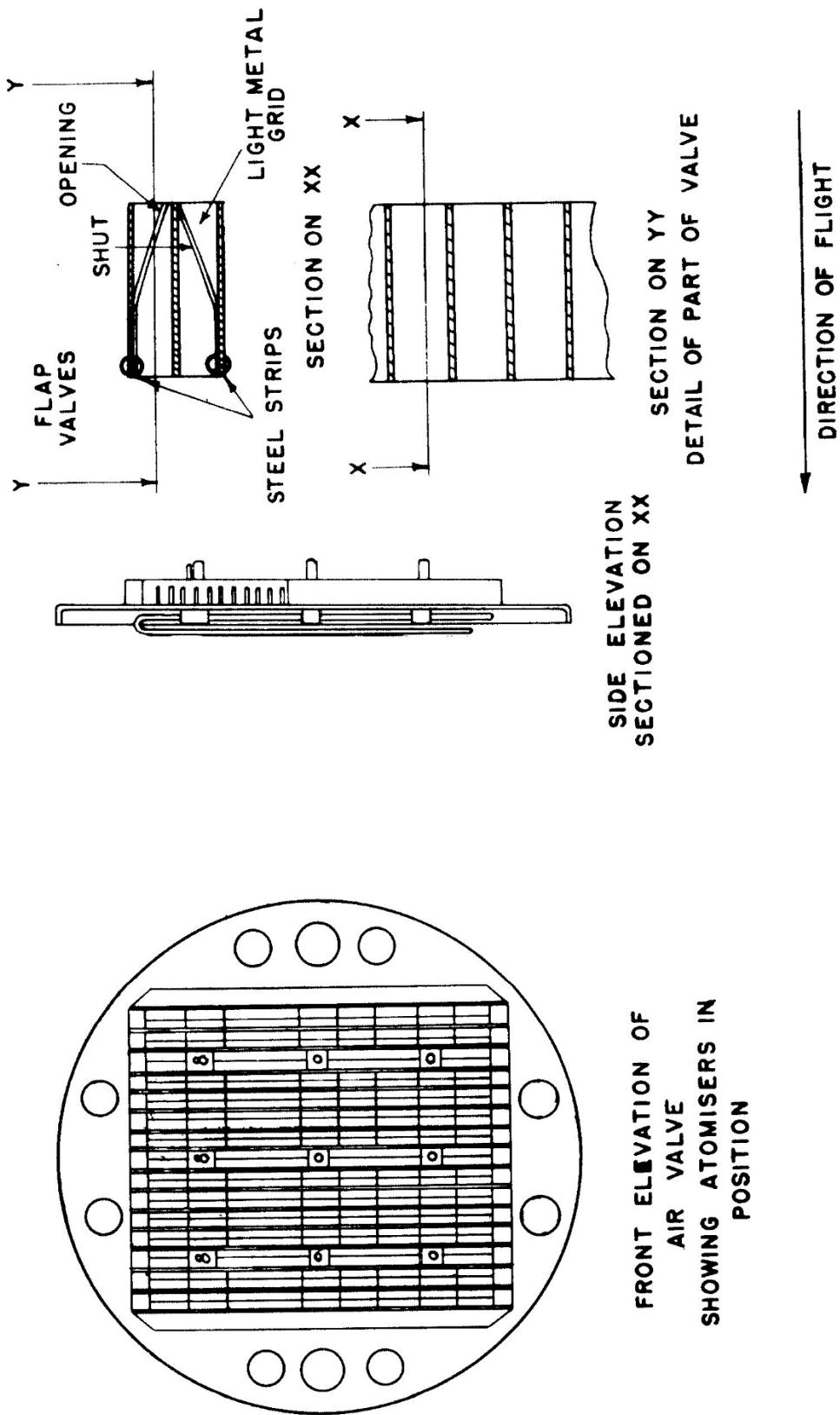


Рисунок 7 – Устройство клапанной решетки ПуВРД Argus As 109-014

Запуск двигателя осуществляется путём подачи тщательно отрегулированного количества топлива и сжатого воздуха напрямую в камеру сгорания, минуя клапанную решётку. Поджиг топливно-воздушной смеси осуществляется с помощью свечи и системы зажигания, которые в дальнейшей работе двигателя не участвуют. Горение топливно-воздушной смеси увеличивает давление в камере сгорания, что приводит к выбросу продуктов горения через резонаторную трубу во внешнюю атмосферу. Пока значение давления газов в камере сгорания выше некоторого значения, клапанная решётка остаётся закрытой. В это время вокруг топливных жиклёров образуется богатая медленно горящая смесь. Выброс продуктов горения создает разряжение в камере сгорания, клапанная решётка открывается, воздух, смешиваясь с топливом, проходит через диффузорную крышку, улучшающую смесеобразование. Таким образом, поток в камере сгорания и резонаторной трубе является пульсирующим с большой амплитудой (рисунки

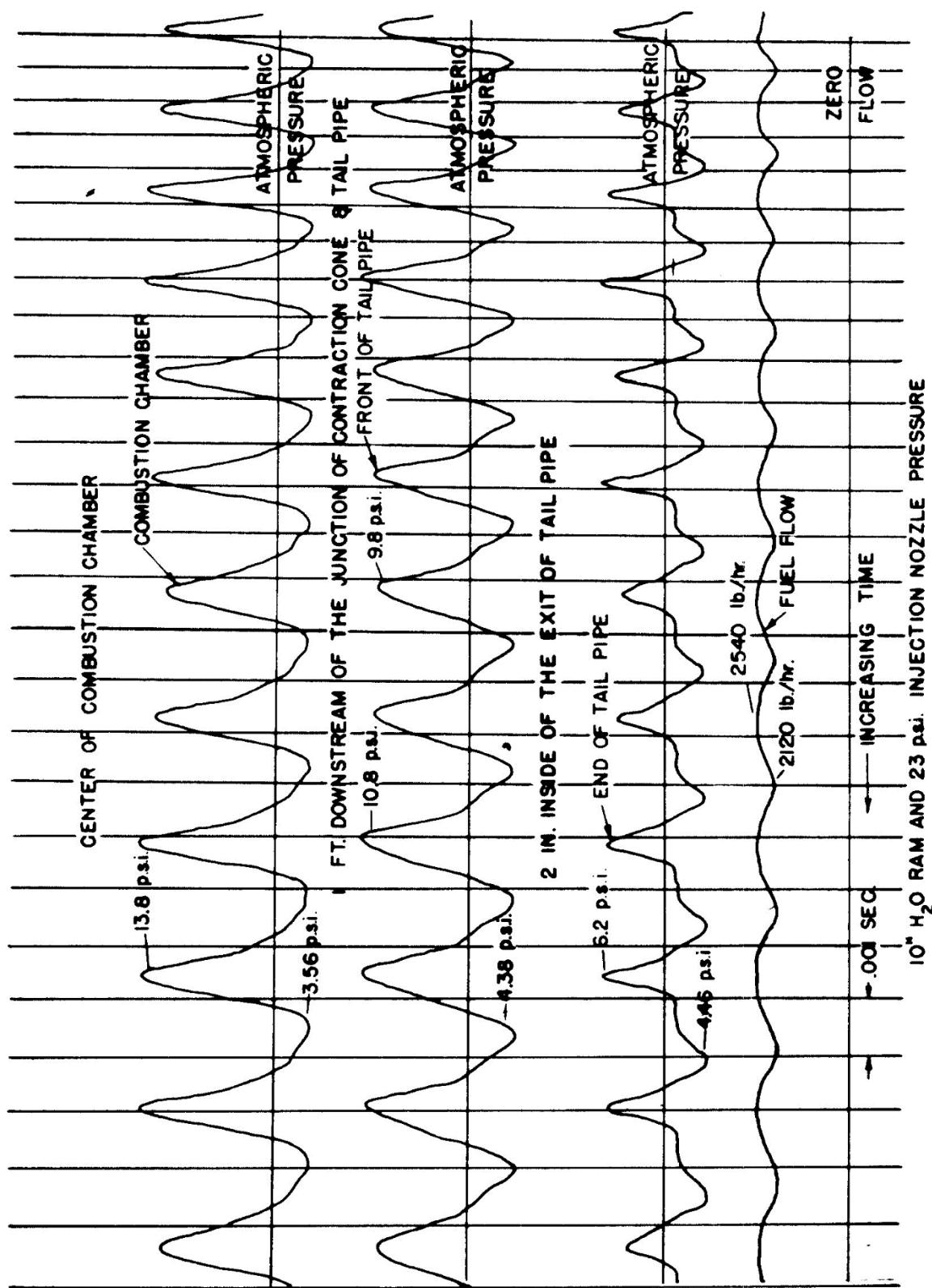


Рисунок 8 – Осциллографмы пульсаций давления при давлении впрыска топлива равном 158,58 кПа

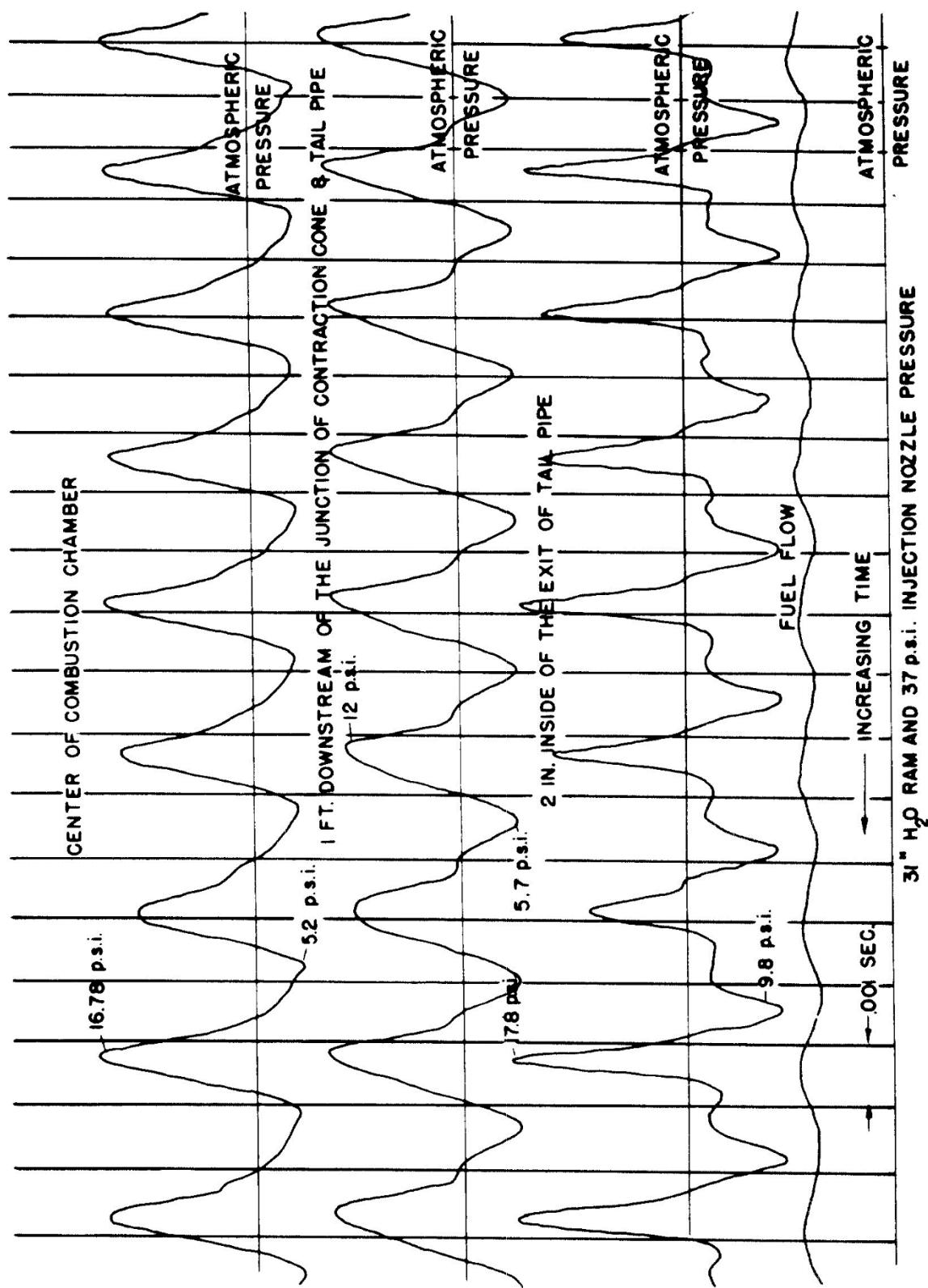


Рисунок 9 – Осциллограммы пульсаций давления при давлении впрыска топлива равном 255,11 кПа

Пусть индекс 0 обозначает величины, соответствующие условиям внешней атмосферы, индекс 1 обозначает условия торможения при закрытых пружинных клапанах, индекс 2 обозначает условия в камере сгорания в конце процесса впуска, индекс 3 обозначает условия в конце процесса горения. Поскольку сжатие от свободного потока до давления торможения на самом деле является обратным изоэнтропическому расширению, условия в камере теперь являются условиями торможения, а условия выхлопа теперь являются условиями свободного потока. Таким образом, отношение давления торможения p_1 к давлению внешней атмосферы p_0 выглядит следующим образом:

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_0^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (1)$$

где γ – показатель адиабаты;

M_0 – число Маха.

Отношение температур выглядит следующим образом:

$$\frac{T_1}{T_0} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_0^2. \quad (2)$$

Когда открывается клапанная решётка, в камеру сгорания втекает воздух через диффузорную крышку, где скорость потока может приближаться к скорости звука. Другими словами, давление в диффузорной крышке примерно вдвое меньше давления p_1 . Форма диффузоров способствует тому, что очень малая часть кинетической энергии переходит в энергию давления. Таким образом, мы можем предположить, что:

$$p_2 = \frac{p_1}{2}. \quad (3)$$

Температура T_2 , являющаяся представлением полной энергии покоящегося газа, должна быть такой же, как T_1 , поскольку не может произойти заметных потерь тепла. Будем считать, что горение осуществляется при постоянном объеме. Таким образом, если пренебречь небольшим количеством топлива в потоке газа, то добавленное тепло h на единицу массы воздуха составит:

$$h = C'_V (T_3 - T_2) = \frac{1}{\gamma'} C'_p T_3 \left(1 - \frac{T_2}{T_3}\right). \quad (4)$$

Поскольку горение осуществляется при постоянном объеме:

$$\frac{T_2}{T_3} = \frac{p_2}{p_3}, \quad (5)$$

следовательно

$$h = \frac{1}{\gamma'} C'_p T_3 \left(1 - \frac{p_2}{p_3}\right). \quad (6)$$

Предполагается, что процесс выпуска соответствует изоэнтропическому устойчивому расширению от давления в камере p до атмосферного давления p_0 . Расширение газа в камере сгорания также является изоэнтропическим, если не учитывать потери тепла в атмосферу, так как изменение давления в камере сгорания очень медленное. Пусть v будет скоростью выпуска, соответствующей p , тогда имеем:

$$v = \sqrt{\frac{2 \gamma'}{\gamma' - 1} \frac{p}{\rho} \left(1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma' - 1}{\gamma'}} \right)}. \quad (7)$$

где ρ – плотность газа.

Импульс массы газа во время выпуска dm при данной скорости, равен:

$$dI = v dm. \quad (8)$$

Если m – масса до удаления массы dm , то отношение плотности в камере сгорания после удаления dm к плотности до удаления равно:

$$\frac{m - dm}{m}. \quad (9)$$

Аналогично, отношение давлений равно:

$$\frac{p + dp}{p}. \quad (10)$$

Так как процесс в камере сгорания изоэнтропический, следовательно:

$$\frac{p + dp}{p} = \left(\frac{m + dm}{m} \right)^\gamma. \quad (11)$$

Пренебрегая бесконечно малыми более высокого порядка, получаем:

$$\gamma \frac{dm}{m} = - \frac{dp}{p}. \quad (12)$$

Данное выражение показывает уменьшение давления в камере сгорания при уменьшении массы газа на dm во время выпуска. Если $m = \rho \cdot V$, где V – объём камеры сгорания, то выразив dm в выражении 8 через dp , получим:

$$dI = - \sqrt{\frac{2 \gamma'}{\gamma' - 1} \frac{p}{\rho} \left(1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma'-1}{\gamma'}} \right)} \frac{1}{\gamma'} \rho V \frac{dp}{p}. \quad (13)$$

Чтобы найти полный импульс процесса выпуска, необходимо

п

р

о

и

н

$$I = \frac{1}{\gamma'} \sqrt{\frac{2 \gamma'}{\gamma' - 1}} V \int_{p_0}^{p_3} \sqrt{\frac{p}{\rho} \left(1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma'-1}{\gamma'}} \right)} \frac{\rho}{p} dp = \quad (14)$$

т

е

г

$$= \frac{1}{\gamma'} \sqrt{\frac{2 \gamma'}{\gamma' - 1}} (V \rho_3) \sqrt{\frac{p_3}{\rho_3}} \int_{p_0/p_3}^1 \sqrt{\frac{1}{\eta^{\frac{\gamma'-1}{\gamma'}}} \left(1 - \left(\frac{p_0}{p_3} \right)^{\frac{\gamma'-1}{\gamma'}} \frac{1}{\eta^{\frac{\gamma'-1}{\gamma'}}} \right)} d\eta,$$

р

и

д

р Но $V \rho_3$ – это общая масса газа в камере сгорания в начале процесса
 о выпуска, и $\sqrt{\gamma' \frac{p_3}{\rho_3}}$ – это скорость звука a_3 , соответствующая условиям в камере
 в сгорания в конце сгорания. Если v_e обозначить эффективную скорость
 выпуска, то получим:

ь

п

$$\frac{v_e}{a_3} = \frac{1}{\gamma'} \sqrt{\frac{2}{\gamma' - 1}} \int_{p_0/p_3}^1 \frac{1}{\eta^{\frac{\gamma'-1}{\gamma'}}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_0}{p_3} \right)^{\frac{\gamma'-1}{\gamma'}} \frac{1}{\eta^{\frac{\gamma'-1}{\gamma'}}}} d\eta. \quad (15)$$

о Ч

и

я

ж

и

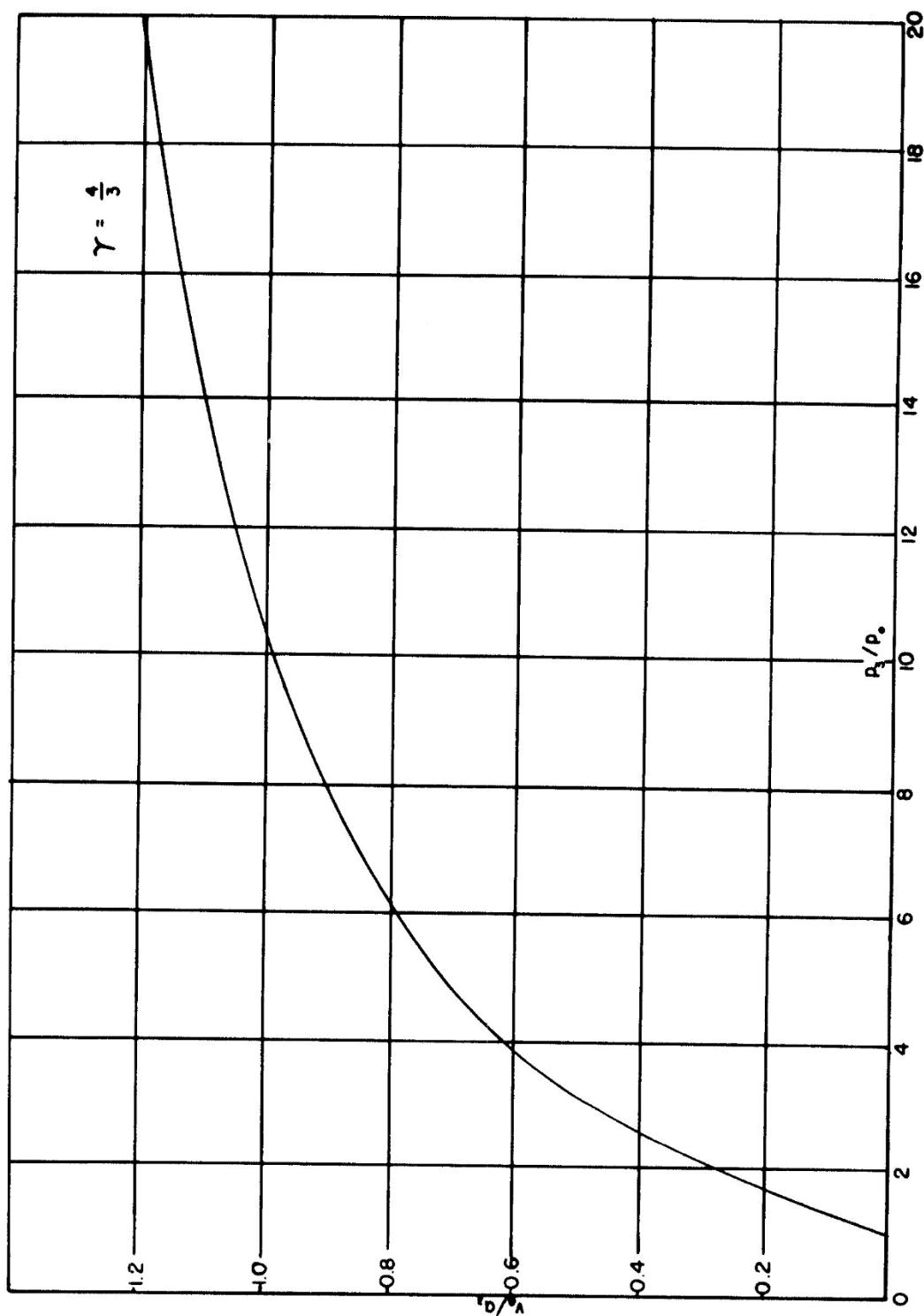


Рисунок 10 – Численное решение при $\gamma = 1,333$

Если у нас есть средний массовый расход, равный одной единице в секунду, средняя тяга равна $1 \cdot v_e$. Эта тяга уменьшается на величину импульса

впуска $1 \cdot v_0$, где v_0 — скорость полета. Таким образом, фактическая тяга для массового расхода одной единицы в секунду равна $1 \cdot (v_e - v_0)$. Если H — теплотворная способность топлива на один килограмм и η_b — эффективность сгорания, то удельный расход топлива $s \frac{\text{кг}}{\text{час} \cdot \text{кгс}}$ равен:

$$s = \frac{3600 h}{778 H \eta_b (v_e - v_0)} . \quad (16)$$

Подставив значение h из выражения 6 и с небольшим сокращением, имеем:

$$s = \frac{3600 a_3 \left(1 - \frac{p_2}{p_3}\right)}{778 H \eta_b \left(\frac{v_e}{a_3} - M_0 \left(\frac{a_0}{a_3}\right)\right)} \frac{1}{\gamma' (\gamma' - 1)} . \quad (17)$$

Отношение скоростей звука определяется следующим выражением:

$$\left(\frac{a_3}{a_0}\right)^2 = \frac{\gamma' R' T_3}{\gamma R T_0} = \frac{C'_p}{C_p} \frac{\gamma' - 1}{\gamma - 1} \frac{p_3}{p_2} \frac{T_1}{T_0} . \quad (18)$$

Удельный расход топлива можно легко определить, если знать
о
т
н
о
ш
е
н
и
е

д
з

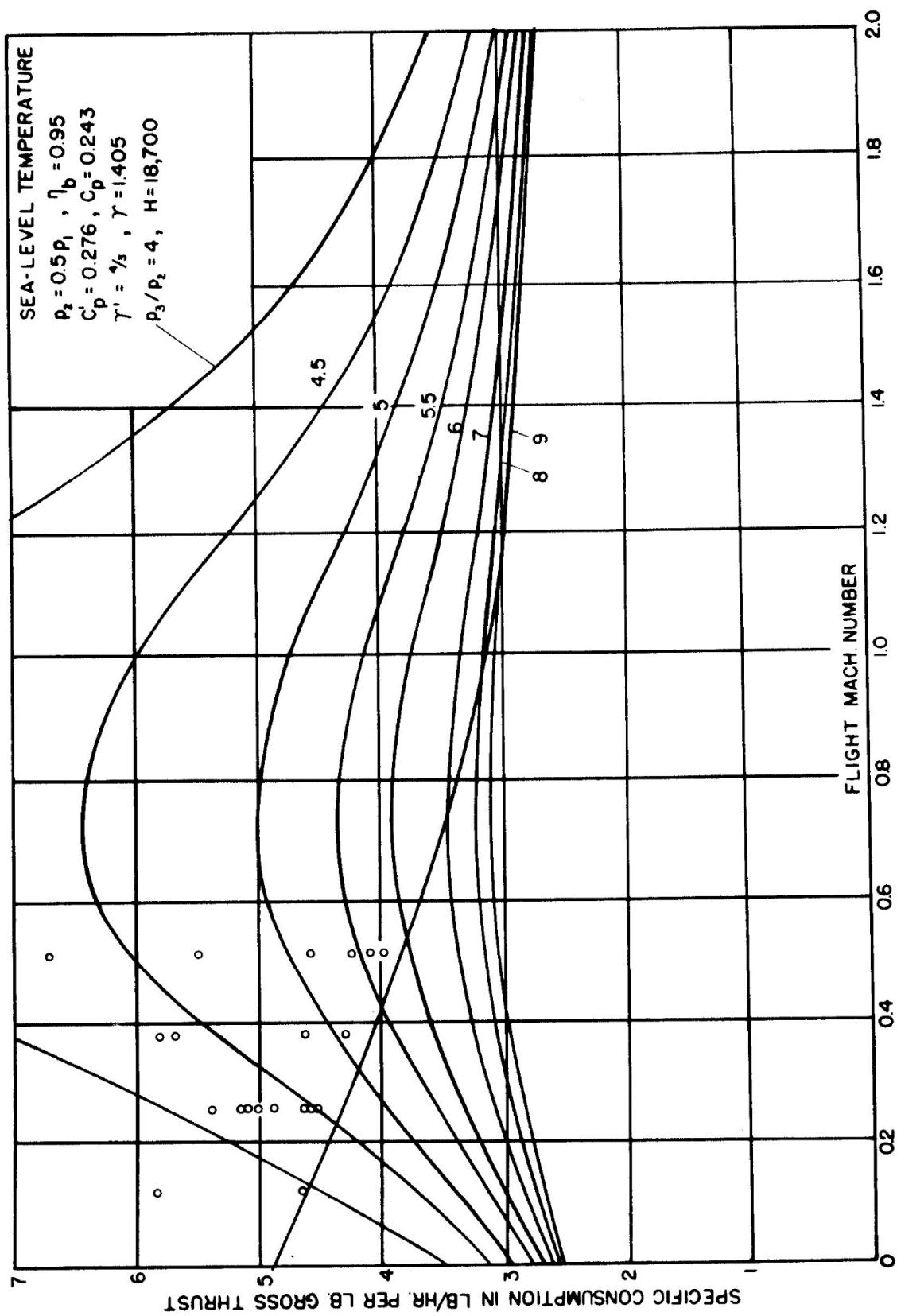


Рисунок 11 – Удельный расход топлива

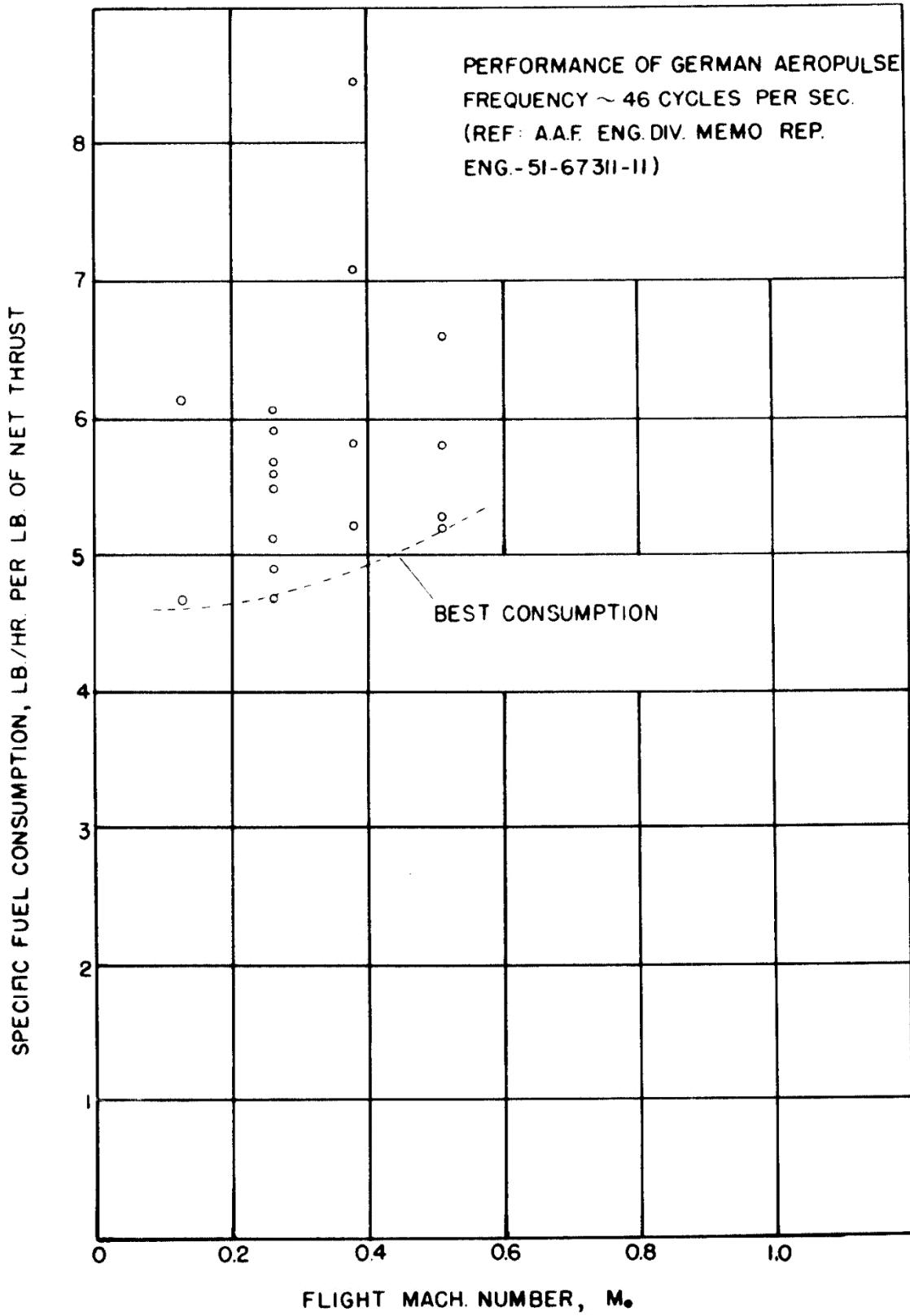


Рисунок 12 – Удельный расход топлива (продолжение)

Таким образом, при фиксированном отношении давлений p_3/p_2 удельный расход топлива увеличивается с увеличением скорости полета. Другими словами, увеличение эффективной скорости на выходе из-за более высокого давления торможения при более высокой скорости полета недостаточно для компенсации потерь, обусловленных импульсом впуска.

Средняя тяга двигателя зависит от скорости потока воздуха и соотношения топливно-воздушной смеси. Скорость, с которой воздух втекает в двигатель за единицу времени, зависит от заряда за цикл и количества циклов в секунду. Однако все три фактора взаимосвязаны. Например, если количество циклов в секунду очень велико, давление наддува в камере будет низким из-за быстрого ускорения, необходимого для втекания воздуха в камеру сгорания. Другими словами, заряд за цикл имеет тенденцию уменьшаться по мере увеличения частоты. Кроме того, процесс сгорания также имеет тенденцию ограничивать соотношение смеси, которое можно было бы эффективно использовать при более низких значениях, если бы частота была увеличена по мере сокращения времени сгорания. Таким образом, средняя тяга двигателя, являющаяся возрастающей функцией произведения всех трех факторов, имеет максимум относительно скорости впрыска топлива и частоты, то есть длины резонаторной трубы.

Измеренная эффективная тяга ПуВРД Argus As 109-014 в зависимости от числа Маха для условий на уровне моря показана на рисунке 13. Различные точки для данного числа Маха являются результатом разной скорости впрыска топлива. Более высокие расходы топлива, конечно, дают большую тягу до тех пор, пока не будет достигнута максимальная тяга, соответствующая данному числу Маха. Дальнейшее увеличение расхода топлива приводит к ухудшению горения и, как следствие, снижению тяги. Наибольшая тяга примерно соответствует этим максимальным значениям.

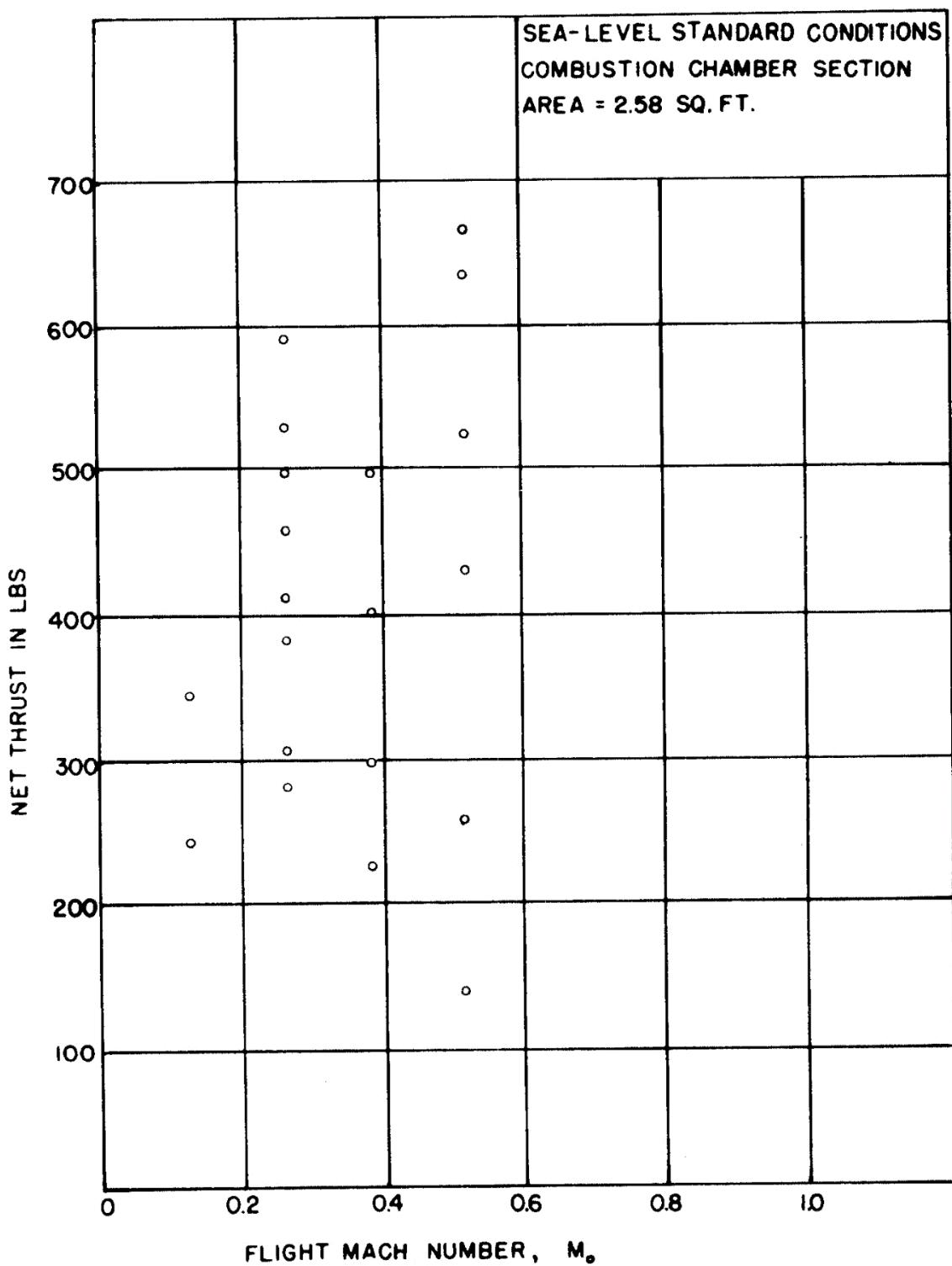


Рисунок 13 – Эффективная тяга ПуВРД Argus As 109-014

Если сохранить отношение давлений в начале и в конце сгорания, а частоту и число Маха полета оставить прежними, то тяга двигателя будет прямо пропорциональна атмосферному давлению. Таким образом, если F' —

т

я

г

а

,

$$F' = F \frac{p'_0}{p_0} . \quad (19)$$

Фактически отношение давлений сгорания и частота зависят как от соотношения смеси, так и от температуры воздуха. То, что температура атмосферы входит в соотношение, можно увидеть из следующих рассуждений. Если температура атмосферы мала, то и температура начала горения будет низкой при прочих равных. Сохраняя соотношение топливно-воздушной смеси и эффективность сгорания одинаковыми, теплота сгорания, приходящаяся на единицу массы газа, и повышение температуры газа будут одинаковыми, но отношение абсолютных температур и, следовательно, отношение давлений будет выше из-за более низкой температуры в начале горения. Из-за этого реальные значения тяги могут быть выше вычисленных по выражению (19). Однако более медленное горение при более низких давлениях и, следовательно, более низких частотах может компенсировать эту разницу. Таким образом, выражение (19) можно использовать для расчета высотных характеристик двигателя при условии, что соотношения смесей на двух высотах одинаковы.

Чтобы сравнить тягу данного ПуВРД с другими силовыми установками, полезно выразить эффективную тягу $F_{\mathcal{E}}$ через коэффициент тяги, определяемый следующим образом:

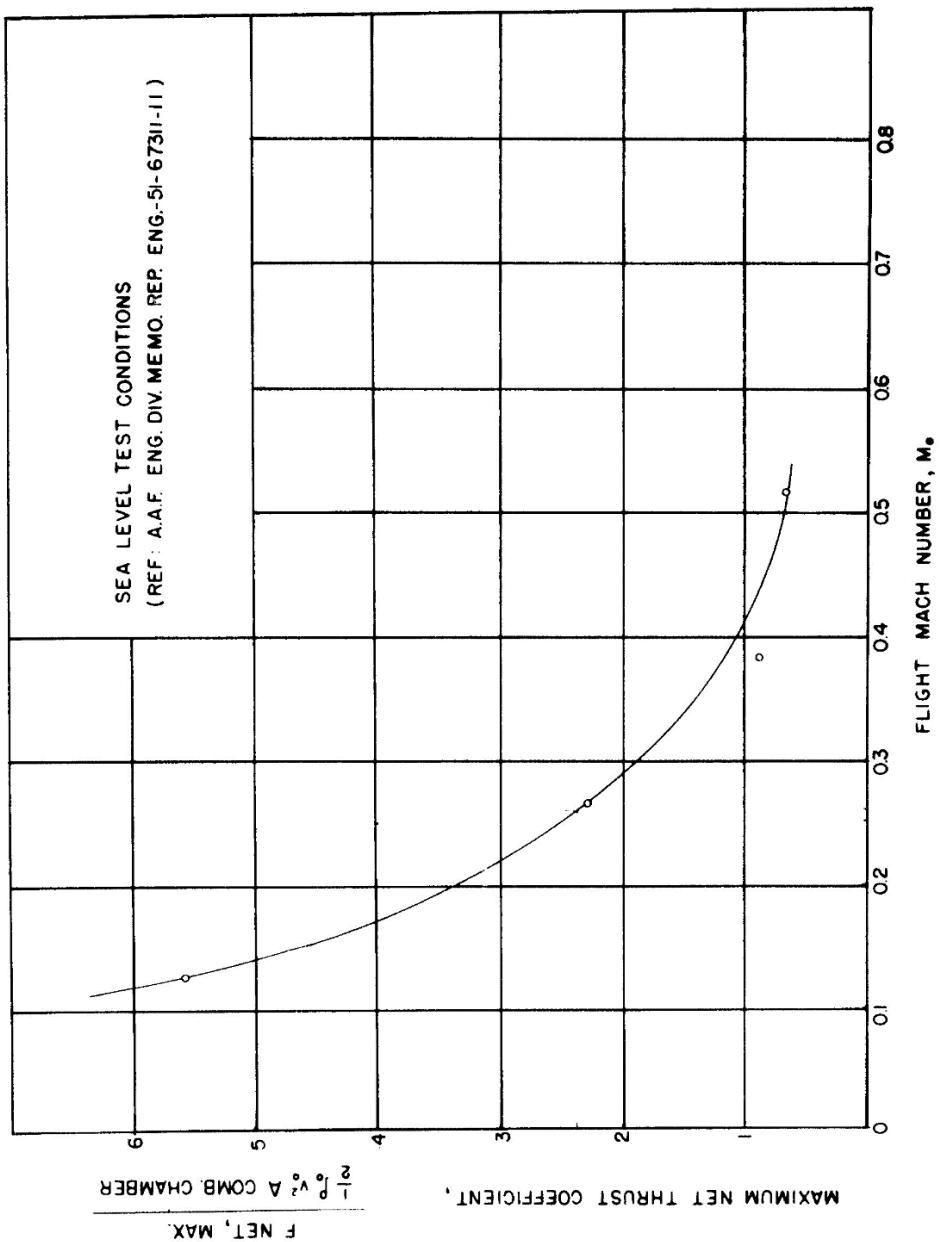
$$C_F = \frac{F_{\mathcal{E}}}{\frac{1}{2} \rho_0 v_0^2 A} \quad (20)$$

– площадь поперечного сечения камеры сгорания.

Максимальные значения коэффициента тяги данного ПуВРД, основанные на данных, полученных опытным путем, приведены на рисунке

В

стatische схемы условий вибрации



$v_0=0$, быстро
уменьшается с увеличением скорости.

Рисунок 14 – Максимальные значения коэффициента эффективной тяги

Таким образом, наиболее значительным недостатком всех ПуВРД с механическими клапанами является то, что эффективное сечение клапанов значительно меньше их полного поперечного сечения. Для ПуВРД Argus As эффективное сечение составляет лишь примерно 60% лобовой площади впускного клапана. Для повышения эффективности работы двигателя необходимо отказаться от механического клапана.

ПуВРД с аэродинамическими клапанами

Пауль Шмидт и Жан Анри Бертен протестировали ряд конструкций ПуВРД с вогнутыми кольцевыми перегородками во впусканом тракте, которые обеспечивали большое сопротивление обратному потоку, но легко пропускали свежий заряд. Версия воздухозаборника Бертена изображена на рисунке 15. Воздух из окружающей среды сталкивается с рядом перегородок, но легко проходит мимо них. Перегородки имеют все более широкие отверстия, образующие диффузор.

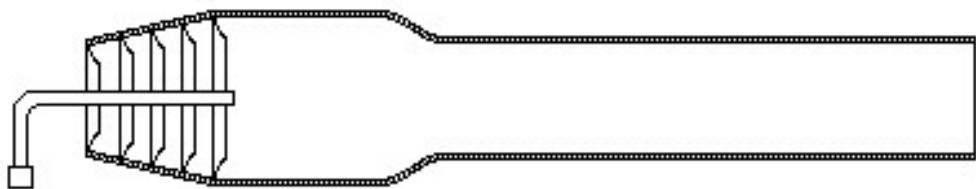


Рисунок 15 – ПуВРД конструкции Бертена

Горячий выхлопной газ будет пытаться расширяться по мере продвижения вперед (влево на рисунке), и все большее его количество будет задерживаться в карманах между перегородками. Тем не менее, все опробованные конфигурации обеспечивали меньшую тягу и потребляли

больше топлива, чем эквивалентные двигатели с механическими клапанами. Большинство из них также имели некоторый обратный выброс.

На рисунке 16 показан ПуВРД конструкции Шмидта. Здесь несимметричность сопротивления потоку должна обеспечиваться благодаря боковым карманам, расположенным вдоль основного канала. В действительности продукты горения быстро заполняют небольшие вогнутые карманы и образуют застойные зоны, оказывающие небольшое сопротивление обратному потоку.



Рисунок 16 – ПуВРД конструкции Шмидта

Никола Тесла предложил свою конструкцию аэродинамического клапана, показанную на рисунке 17.



Рисунок 17 – Аэродинамический клапан конструкции Теслы

При движении газа (слева направо на рисунке) часть потока в боковых каналах клапана изменяет свое направление движения, оказывая сопротивление движению всему потоку. Существенными недостатками

аэродинамических клапанов такой конструкции являются большая масса, малое проходное сечение.

ПуВРД Escopette 3340

В 1950 году французская компания SNECMA представила ПуВРД , конфигурация которого показана на рисунке 18.

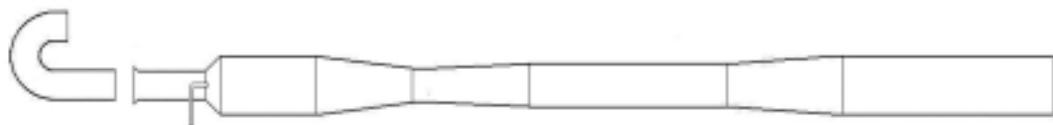


Рисунок 18 – ПуВРД Escopette 3340

Впускной тракт состоит из двух труб. Первая труба имеет изгиб и обоими своими срезами направлена назад. Вторая труба находится на некотором расстоянии от первой и непосредственно соединяется с камерой сгорания. Таким образом, впуск осуществляется через зазор между первой и второй впускными трубами. Такая конструкция позволяет двигателю вести себя так, как если бы его длина была переменной: длинной во время фазы расширения и короткой во время всасывания. Предполагается, что во время расширения изогнутая впускная труба является частью эффективной длины двигателя и увеличивает тягу. Однако во время фазы впуска большая часть воздуха проникает в двигатель через зазор между впускными трубами, что способствует снижению сопротивления на впуске.

Выхлопная труба представляет собой серию ступеней увеличивающегося сечения. Предполагается, что каждый переход от прямого участка к расширяющемуся конусу представляет собой точку, от которой волны давления, распространяющиеся по трубе, будут отражаться в противоположных направлениях и с противоположным знаком. Волна сжатия

(высокого давления), пройдя ступеньку, отразится назад как волна разрежения (низкого давления) и наоборот. Каждый участок трубы работает при температуре, отличной от температуры предыдущего или последующего этапа, а это означает, что волна будет распространяться с разными скоростями. В данном двигателе было реализовано использование избыточного тепла в потоке выхлопных газов для увеличения тяги. Дело состоит в том, что из-за отсутствия сквозного потока воздуха в пульсирующем двигателе масса газов, на которую может действовать значительная тепловая энергия, очень мала. Другими словами, коэффициент энергомассообмена низкий и результирующая тяга ниже, чем могла бы быть. В данной конструкции ПуВРД выхлопная труба была удлинена к концу так, что значительно увеличился объем выхлопного канала, а также придало форму, которая способствовала забору свежего воздуха во время впуска. Таким образом, двигатель наполняется большим количеством свежего воздуха, который используется в качестве дополнительной двигательной массы.

ПуВРД конструкции Кентфилда

Дж. А. К. Кентфилд предложил конструкцию ПуВРД с дополнительной изогнутой трубой (рекуператором) с расширяющимся конусом для увеличения тяги для увеличения массы воздуха, которой передается тепловая энергия

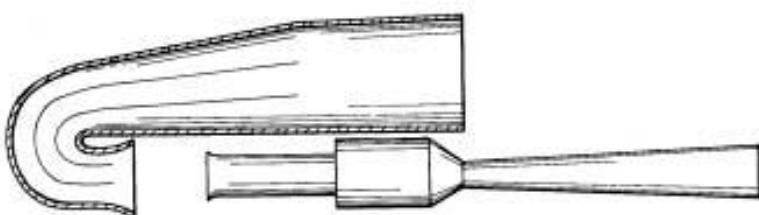


Рисунок 19 – ПуВРД конструкции Кентфилда

По словам Кентфилда, запатентовавшего эту конструкцию, выигрыш более чем компенсирует потери на сопротивление и турбулентность. Он много экспериментировал с вариациями на эту тему. Большинство рекуператоров были осесимметричными и использовали внутренние лопатки, помогающие контролировать поток (рисунок 20).

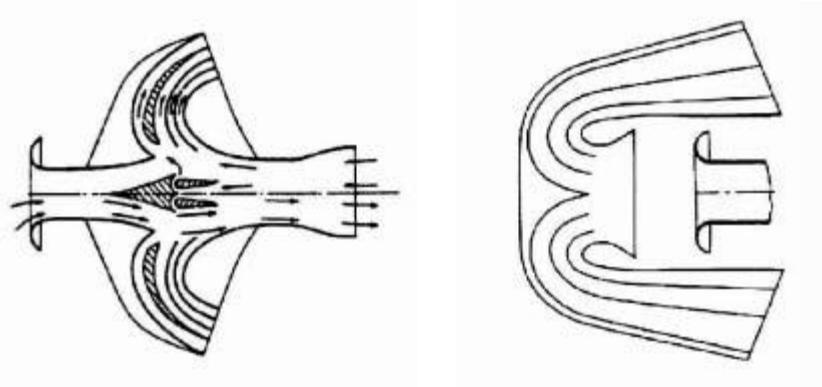


Рисунок 20 – Рекуператоры Кентфилда

Рекуператор, изображенный слева на рисунке 20, использует давление набегающего воздуха. У него почти прямой путь для свежего воздуха от переднего воздухозаборника до камеры сгорания. Следует обратить внимание на две небольшие лопатки аэродинамического профиля в центральном канале, сразу за впускным конусом. Когда горячий выхлопной газ выталкивается вперед, часть, вдуваемая в зазор между лопатками, разделяется на два потока: один идет вверх, а другой – вниз. Каждый поток образует своеобразную газовую завесу, пересекающую путь основного потока. Завеса отклоняет поток выхлопных газов к изогнутым каналам, которые разворачивают поток и в конечном итоге выбрасывают его назад. В результате почти весь выхлопной газ, который обычно выбрасывается из впускного отверстия, отклоняется и увеличивает тягу.

ПуВРД «Мессершмитт»

В начале 1970-х годов компания «Мессершмитт» разработала ПуВРД, особенностью которого была возможность работы как в пульсирующем режиме на низких скоростях, так и в непрерывном на высоких (рисунок 21).

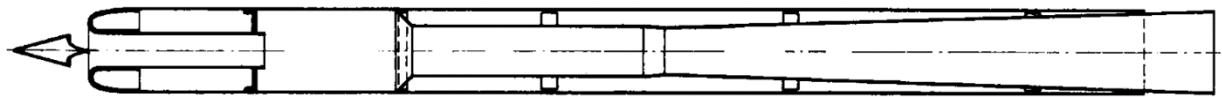


Рисунок 21 – ПуВРД "Мессершмитт"

Для решения этой задачи требовался дефлектор, который эффективно перенаправлял бы обратный поток, идущий из воздухозаборника, но не представлял бы слишком большого препятствия для поступления свежего воздуха (рисунок 22).

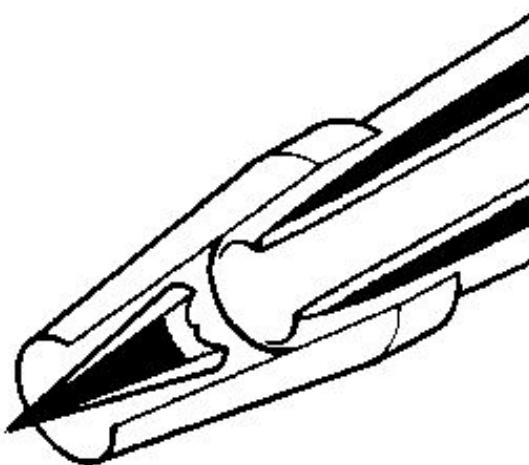


Рисунок 22 – Дефлектор ПуВРД "Мессершмитт"

Дефлектор состоит из простого острого конуса, задняя часть которого имеет форму, позволяющую отклонять взрывную волну назад. Даже на

относительно небольшой скорости отклоненный газовый поток изгибался назад, вокруг двигателя, чему способствовал эффект Коанда. Для малых скоростей конструкторы предусмотрели носовой обтекатель, помогающий увлекать поток. На значительной доле скорости звука набегающий поток воздуха настолько силен, что даже в дефлекторе больше нет необходимости, поскольку горячий газ плотно захватывается между воздушным потоком и внешней поверхностью двигателя.

апотированные ПуВРД

Компания «Аргус» предложила конструкцию ПуВРД, камера сгорания которого представляет собой полусферическую крышку (колпак) с выпускной трубой, направленной вперед, и резонаторную трубу, между которыми есть зазор (рисунок 23).

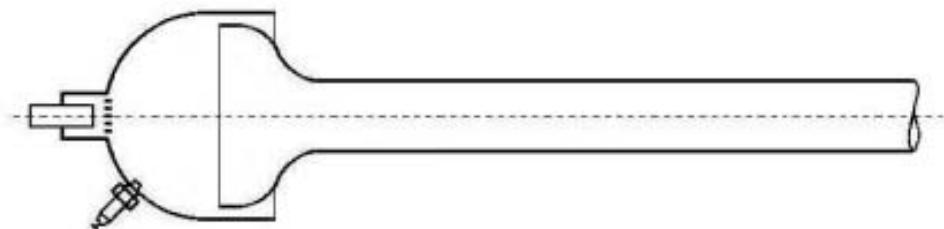


Рисунок 23 – Капотированный ПуВРД «Аргус»

Топливо впрыскивается через жиклер, закрытый от камеры сгорания металлической сеткой. Сетка предотвращает горение газа в выпускной трубе. Во время испытаний этого двигателя воздух по давлению подавался во выпускную трубу. Давление нагнетаемого воздуха не позволяло горячему газу попасть наружу, и почти весь он уходил в резонаторную трубу.

На рисунке 24 представлена конфигурация капотированного ПуВРД «Аргус» с кольцевой камерой, через которую должен пройти воздух, прежде чем он попадет в камеру сгорания.

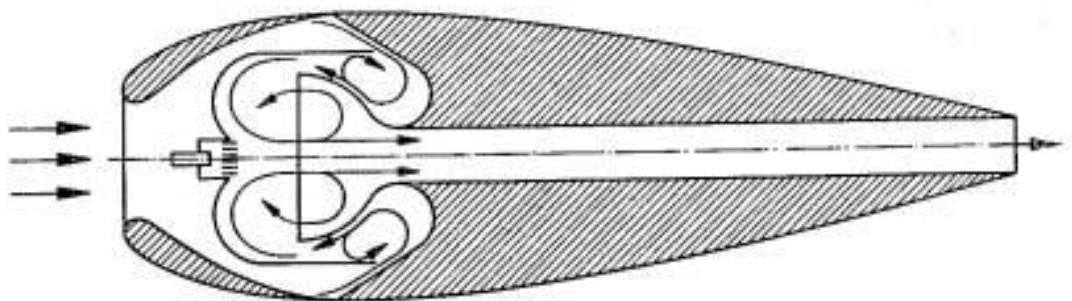


Рисунок 24 – Капотированный ПуВРД «Аргус» с кольцевой камерой

Продукты горения запираются в камере сгорания также благодаря узкой щели, через которую кольцевая камера сообщается с внешней средой.

Компания «Сондерс Рой» в начале 1950-х предложила свою конструкцию капотированного ПуВРД (рисунок 25).

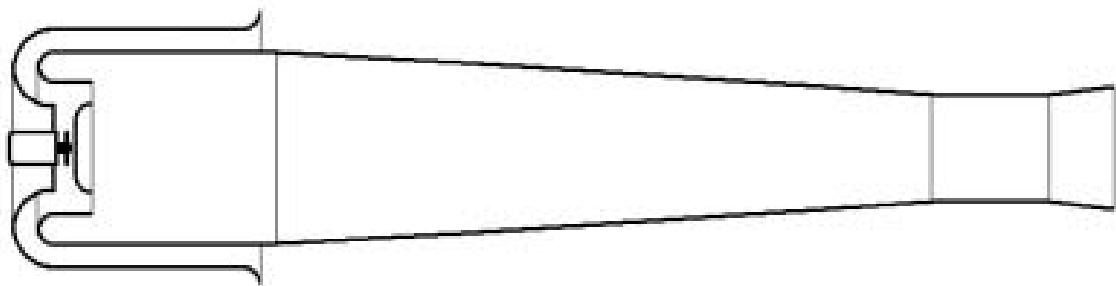


Рисунок 25 – Капотированный ПуВРД «Сондерс Рой»

Кожух впускного тракта изгибается внутрь, повторяя кривизну передней части камеры сгорания. Во время расширения большая часть горячего газа выходит через выхлопную трубу в задней части двигателя. Подача топлива

осуществляется с помощью радиально расположенных жиклеров, впрыскивающих топливо под прямым углом к потоку свежего воздуха. Особенностью конструкции данного ПуВРД являются наличие плавного сужения резонаторной трубы, камера сгорания не имеет выраженной выпуклости. Конструкция двигателя обусловлена следующими требованиями – предотвратить прорыв продуктов горения наружу через впускной тракт при наименьшем сопротивлении со стороны выпускного тракта.

Джозеф Г. Фоа предложил конструкцию капотированного ПуВРД аналогичного «Сондерс Роу», но с дополнительным кольцевым каналом для впуска воздуха (рисунок 26).

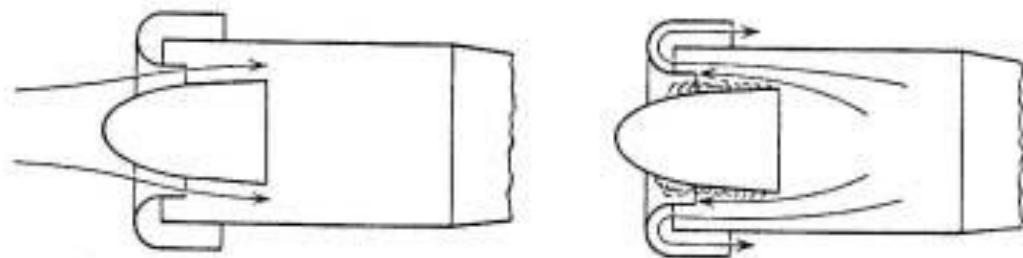


Рисунок 26 – Капотированный ПуВРД конструкции Фоа

Такая конструкция впуска снижает насосные потери и позволяет повысить тягу благодаря большему давлению наддува на высоких скоростях полета.

уВРД с боковым впускным трактом

В общем случае для работы ПуВРД не имеет принципиального значения расположение впускного тракта относительно всего остального двигателя. Тем не менее, каждый вариант расположения впускного тракта имеет свои

преимущества и недостатки. Одним из ПуВРД с боковым впускным трактом является двигатель конструкции Джозефа Дж. Логана, показанный на рисунке

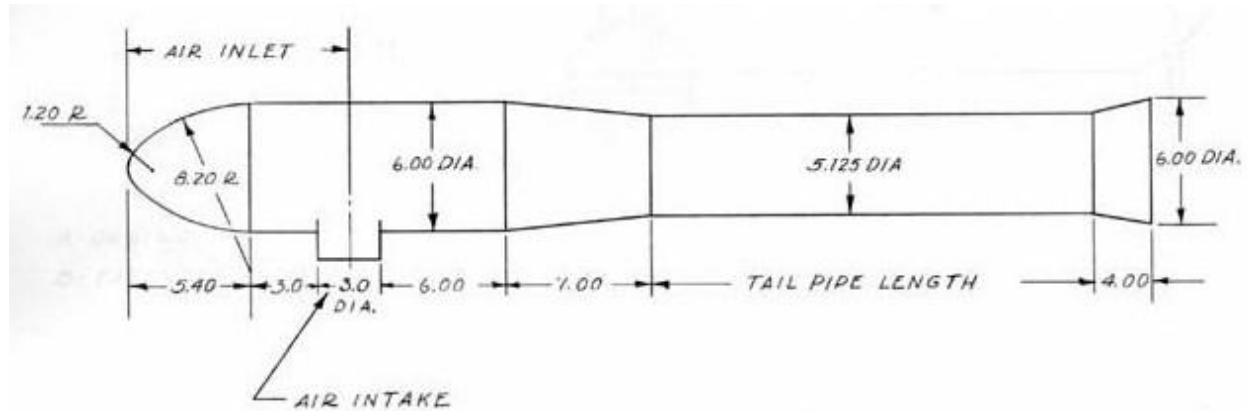


Рисунок 27 – ПуВРД конструкции Логана

Изначально боковое расположение впускного тракта обуславливалось необходимостью расположить ПуВРД на несущем винте вертолета в качестве основной силовой установки. В последствии оказалось, что боковое расположение впускного тракта способствует лучшему смесеобразованию благодаря излому потока.

Ещё одним примером ПуВРД с боковым впускным трактом является разработка Е. М. Глухарева (рисунок 28). ПуВРД разрабатывался для применения в качестве основной силовой установки на вертолетах и летающих платформах с вертикальным взлетом и посадкой.

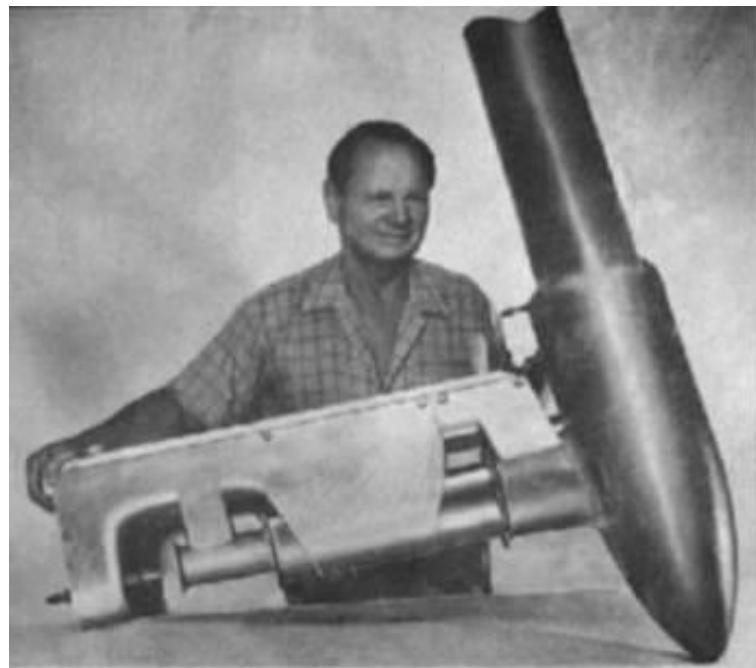


Рисунок 28 – ПуВРД конструкции Глухарева

Особенностями данного ПуВРД являются, кроме бокового впускного тракта, наличие змеевика в камере сгорания, через который проходит топливо перед распылением, и наличие двух эжекторов во впусканом тракте. Предполагается, что в змеевике происходит термическое разложение углеводородов с последующим охлаждением во впусканом тракте, что приводит к образованию соединений, интенсифицирующих процесс горения.

ПуВРД с задним впускным трактом

В 1950-х Роберт Х. Боханон предложил гибридную конструкцию пульсирующего воздушно-реактивного двигателя (рисунок 29).

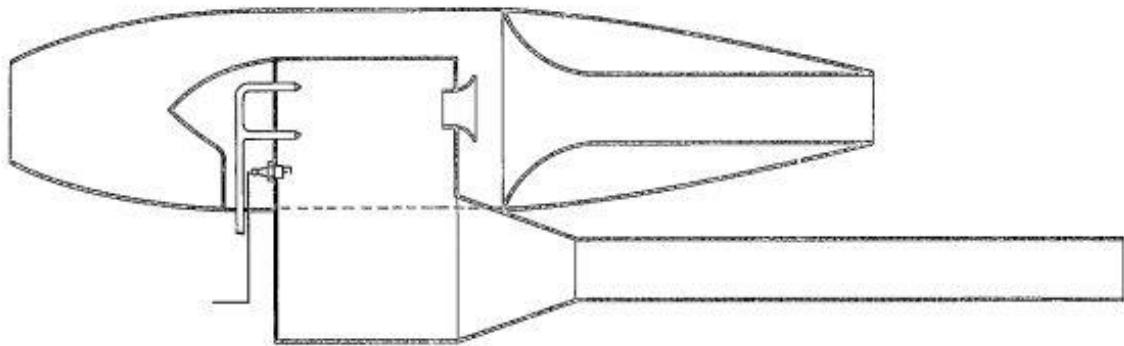


Рисунок 29 – Гибридный ПуВРД конструкции Боханона

Основой его конструкции является ПуВРД с задним расположением впускного тракта, представляющего собой очень короткую впускную трубу. На передней стенке камеры сгорания ПуВРД находятся топливные жиклеры и свеча зажигания, необходимая для запуска двигателя. Часть камеры сгорания расположена внутри веретенообразного капота, с помощью которого часть теплоты от сгорания топлива передается набегающему потоку воздуха, что обеспечивает некоторый прирост тяги.

Конструкция ПуВРД с задним впускным трактом типа «Термоджет» использовалась на воздушной мишени Е95М (рисунок 30).



Рисунок 30 – Воздушная мишень Е95М с ПуВРД М135

В таблице 1 приведены основные технические характеристики мишени.

Таблица 1 – Технические характеристики воздушной мишени Е95М

Высота полета, м	3000
Радиус действия, км	50
Максимальная скорость горизонтального полета, км/ч	300...400
Продолжительность полета, не более, час	0,5
Взлетная масса, кг	70
Длина, м	2,1

Продолжение таблицы 1

Размах крыла, м	2,4
Диаметр фюзеляжа, м	0,25
Кратность применения	10
Диапазон рабочих температур, °C	-30...+40

ПуВРД имеет две одинаковых впускных трубы и одну резонаторную трубу, соединенные с камерой сгорания. Большая часть воздуха из атмосферы попадает в камеру сгорания двигателя через короткие впускные трубы. Одна часть продуктов горения выбрасывается через резонаторную трубу, другая – через впускные трубы, направленные назад. Существенным недостатком данной конструкции ПуВРД является её главная особенность – впускной тракт направлен по набегающему потоку воздуха, что резко ограничивает максимальную возможную тягу двигателя на больших скоростях.

уВРД U-образной конфигурации

Существует U-образные конфигурации ПуВРД, особенностью которых является длинная резонаторная труба малого диаметра по сравнению с диаметром впускной трубы. Примерами таких двигателей являются разработки Пьера Серванти (рисунок 31) и Рэймонда М. Локвуда (рисунок 32).

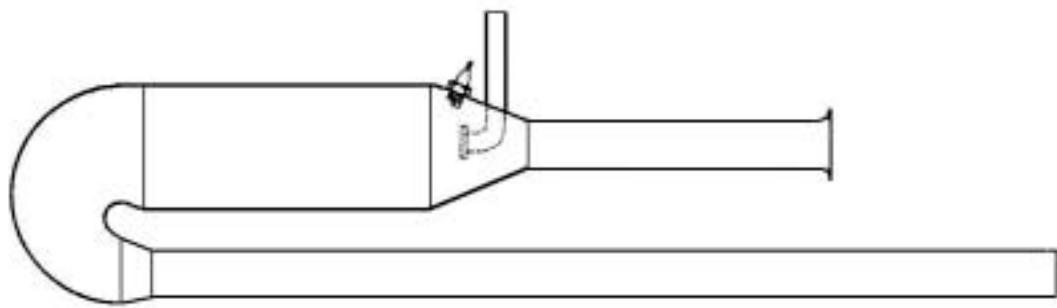


Рисунок 31 – ПуВРД конструкции Серванти

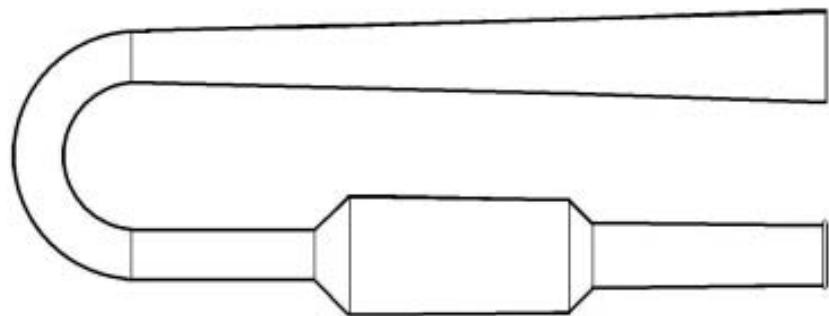


Рисунок 32 – ПуВРД конструкции Локвуда

Утолщенные части этих двигателей являются камерами сгорания, короткие трубы, соединенные с ними – впускные трубы. Также эти ПуВРД могут оснащаться эжекторами, расположенными на срезах выпускных труб, как показано на рисунке 33.

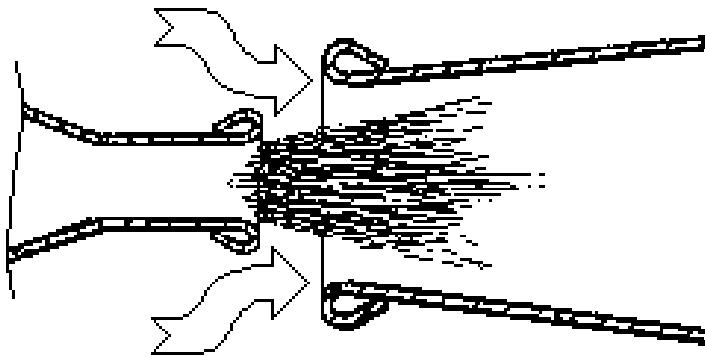


Рисунок 33 – Эжектор в выпускном тракте

Назначение этих эжекторов состоит в увеличении тяги двигателя за счет всасывания и нагрева продуктами горения холодного воздуха из окружающей среды и, тем самым, повышения давления в эжекторе.

Вывод по разделу

В данном разделе были рассмотрены пульсирующие воздушно-реактивные двигатели различных конфигураций. Были описаны их конструктивные особенности, преимущества и недостатки. Разнообразие конфигураций пульсирующих воздушно-реактивных двигателей, имеющих значительные отличия в конструкции, свидетельствует об отсутствии единой методики разработки двигателей данного типа.

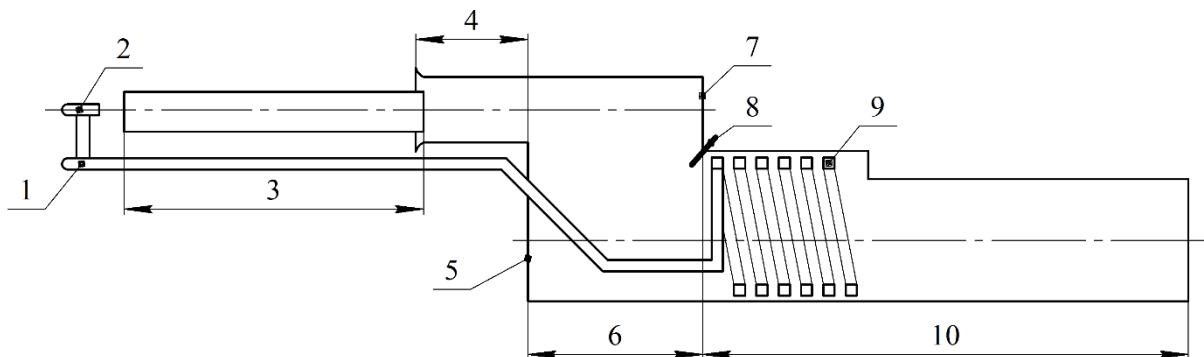
тендовые испытания ЭПуВРД

орядок проведения испытаний

Проведение стеновых испытаний необходимо для определения следующих характеристик:

- резонансной частоты двигателя при отсутствии теплоподвода;
- резонансной частоты двигателя при наличии теплоподвода.

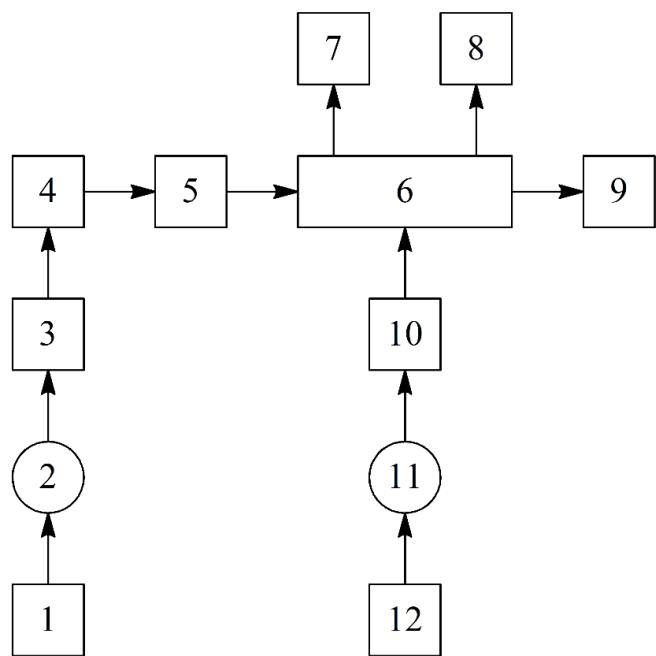
В данной работе объектом исследования является разработка ООО НПФ «РОТОР» – бесклапанный эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель (ЭПуВРД), впускные трубы которого направлены навстречу потоку (рисунок 34) [2-12, 28, 29].



Обозначения: 1 - топливопровод, 2 - топливный жиклер, 3 - первая впускная труба, 4 - вторая впускная труба, 5 - передняя стенка камеры сгорания, 6 - камера сгорания, 7 - задняя стенка камеры сгорания, 8 - козырёк, змеевик, 10 - резонаторная труба.

Рисунок 34 – Предлагаемый к исследованию ЭПуВРД, упрощенное изображение, продольный разрез

Испытания проводились на стенде, схема которого показана на рисунке



Обозначения: 1 - компрессор, 2 - ресивер, 3 - электромагнитный клапан, 4 - регулятор, 5 - воздуходувка, 6 - двигатель, 7 - датчик скорости, 8 - датчик тяги, 9 - датчик температуры, 10 - регулятор, 11 - топливный бак, 12 - компрессор.

Рисунок 35 – Схема испытательного стенда

На рисунке 27 показан двигатель, установленный на испытательном стенде.



Рисунок 36 – Двигатель на испытательном стенде

Перед проведением испытаний с помощью компрессора в ресивер нагнетается воздух. Когда давление в ресивере достигает определённого значения, с помощью электромагнитного клапана осуществляется подача сжатого воздуха по воздухопроводу в воздуходувку через ручной регулятор, с помощью которого устанавливается требуемая скорость истечения воздуха. Воздуходувка представляет собой металлическую трубу прямоугольного сечения, оканчивающуюся сужающимся соплом. Срез сопла расположен на одной оси с выпускными трубами ЭПуВРД на расстоянии не менее 20 см, что согласно экспериментальным результатам, показанными Б. В. Раушенбахом, должно обеспечить акустическое разделение стендового воздухопровода и испытываемой установки, исключить их взаимное влияние [24]. В данном опыте в качестве топлива использовался бензин марки АИ-92. Во время стендовых испытаний подача жидкого топлива в двигатель осуществляется из герметичного топливного бака, в который предварительно нагнетается воздух с помощью отдельного компрессора. Таким образом исключается неравномерность подачи топлива, которая может оказывать влияние на работу двигателя. Топливо подается в двигатель через змеевик, расположенный в резонаторной трубе ЭПуВРД сразу после камеры сгорания. Температура топлива на выходе из змеевика измеряется с помощью термопары. В качестве датчика тяги используется весовой тензодатчик, с которым двигатель соединен посредством жесткой штанги.

Змерительное оборудование

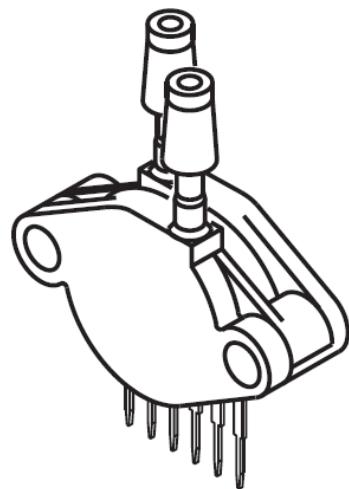
В качестве датчика температуры применен термоэлектрический преобразователь с термопарой в качестве чувствительного элемента. В данном случае используется датчик ДТПК014-00.25/2 производства фирмы ООО «Производственное Объединение Овен», имеющий хромель-алюмелевый чувствительный элемент, изолированный рабочий спай, расположенный внутри латунной защитной гильзы длиной 25 мм, кабельный

вывод длиной 2 м, выполненный стеклонитю K11C6 с пропиткой кремнийорганическим лаком [23]. В таблице 2 представлены некоторые технические характеристики датчика.

Таблица 2 – Технические характеристики датчика ДТПК014-00.25/2

Номинальная статическая характеристика	K (ХА) хромель-алюмель
Рабочий диапазон измеряемых температур, °С	-40...+1000
Схема подключения	Двухпроводная
Сопротивление изоляции, МОм	100
Диаметр термоэлектродной проволоки, мм	0,5
Показатель тепловой инерции, не более, с	20
Степень защиты по ГОСТ 14254	IP54

В качестве датчика воздушной скорости используется трубка Пито, подключенная к дифференциальному пьезорезистивному преобразователю давления. Принцип работы датчика основан на изменении сопротивления тонкопленочных резисторов, нанесенных на поверхность кремниевой мембранны, которая под действием давления деформируется, приводя к деформации резисторов. В данном случае используется датчик MPX5010DP производства фирмы «Freescale Semiconductor, Ltd», имеющий встроенные цепи температурной компенсации, обеспечивающие погрешность измерения не более 5% в диапазоне температур от 0 до 85 °С (рисунок 37). В таблице 3 представлены некоторые технические характеристики датчика [26].



**MPX5010DP
CASE 867C-05**

Рисунок 37 – Датчик воздушной скорости

Таблица 3 – Технические характеристики датчика MPX5010DP

Рабочий диапазон измеряемых давлений, кПа	0...10
Максимальное прикладываемое давление, кПа	40
Напряжение питания, постоянное, В	5,0
Потребляемый ток, мА	5,0
Чувствительность, мВ/кПа	450
Время отклика, мс	1,0
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+125

В качестве датчика тяги используется датчик силоизмерительный тензорезисторный 9035 ДСТ-2,0Р-0,10-Д3-IP54, в таблице 4 представлены некоторые технические характеристики датчика [1].

Таблица 4 – Технические характеристики датчика 9035 ДСТ-2,0Р-0,10-Д3-IP54

Номинальное усилие, кН	2,0
Категория точности	0,10
Рабочий коэффициент передачи (РКП) при номинальной нагрузке, мВ/В	1,5
Начальный коэффициент передачи (НКП) от номинального значения РКП, не более, %	2,5
Сопротивление мостовой схемы входное, Ом	$380 \pm 2,0$
Сопротивление мостовой схемы выходное, Ом	$400 \pm 4,0$
Диапазон рабочих температур, °С (группа исполнения)	-50...+50 (Д3)
Напряжение питания, постоянное, не более, В	12
Степень защиты	IP54

В качестве устройства сбора данных используется цифровой многоканальный самописец EL-100Е производства фирмы ООО «НПФ АДСилаб», поддерживающий одновременную запись множества сигналов датчиков [25]. В таблице 5 представлены некоторые технические характеристики самописца.

Таблица 5 – Технические характеристики самописца EL-100Е

Каналов аналогового ввода (мультиплексируемых)	С общим проводом	32
	Дифференциальных	16
Разрешение АЦП, бит		12
Усилитель	Коэффициенты усиления	1, 2, 5, 10
Входное сопротивление, не менее, МОм		10
Полоса пропускания (-3дБ), не менее, кГц		30
Максимальная частота опроса в одноканальном режиме, кГц		100
Диапазоны входного сигнала	Биполярного, по напряжению, В	±10, ±5, ±2, ±1
Перегрузка по входу, В		± 30
Условия эксплуатации	Температура, °C	0...+55
	Влажность, %	0...90

Анализ результатов испытаний

В ходе проведения стендовых испытаний были получены осцилограммы пульсаций тяги и давления в камере сгорания при наличии теплоподвода и скорости набегающего потока воздуха $W = 60 \text{ м/с}$ (рисунок 38).

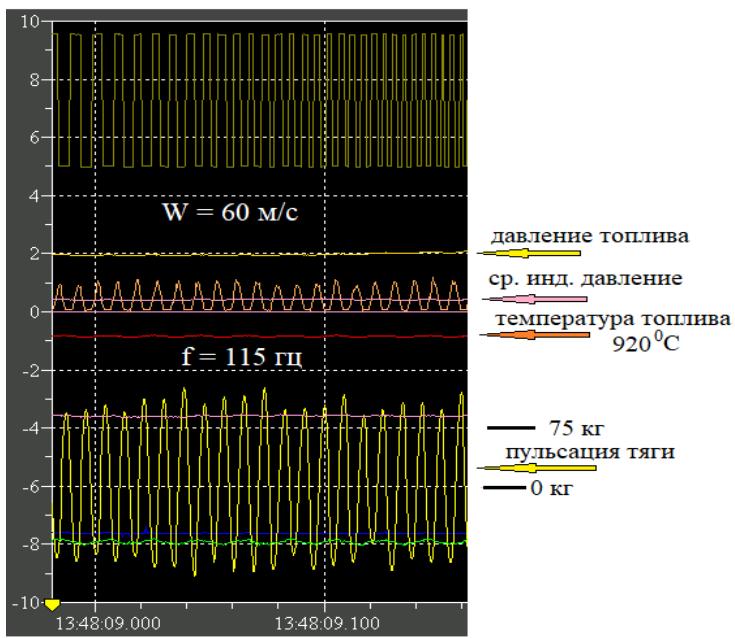


Рисунок 38 – Осциллограммы пульсаций тяги и давления в камере сгорания

Как видно по осциллограмме, пульсация тяги имеет вид близкий к гармоническому колебанию, при этом наблюдается переход сигнала тяги через нулевую отметку в сторону отрицательных значений. Это объясняется наличием отскока упругой мембранны тензодатчика после толчка со стороны двигателя. Частота пульсаций тяги и давления в камере сгорания составляет 115 Гц. Таким образом, рабочий процесс данной конфигурации двигателя действительно является пульсирующим, а сам двигатель представляет собой колебательную систему.

Для определения спектрального состава акустического излучения данной конфигурации двигателя рядом со срезом резонаторной трубы был расположен датчик акустических давлений, сигнал с которого регистрировался осциллографом. Затем с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье была построена амплитудно-частотная характеристика (рисунок 39).

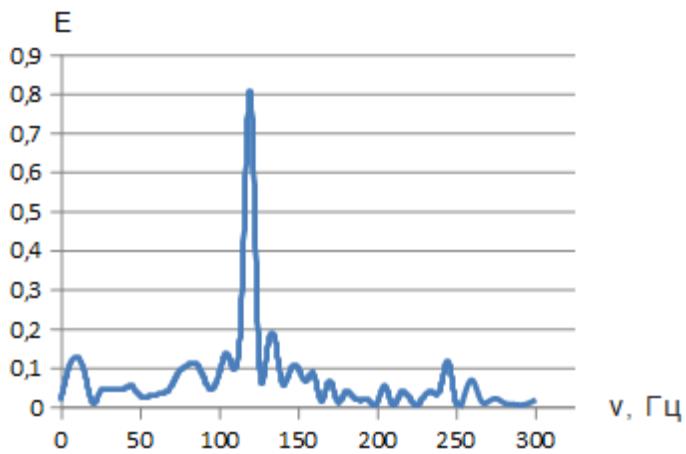


Рисунок 39 – Амплитудно-частотная характеристика двигателя при наличии теплоподвода

Как видно по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) кроме наиболее четко выраженных колебаний на частоте 115 Гц каких-либо значимых по амплитуде колебаний других частот нет.

Также была построена АЧХ по результатам регистрации пульсаций давления на срезе резонаторной трубы двигателя, продуваемого потоком воздуха с той же скоростью, что и в предыдущем опыте, но без подачи топлива и процесса горения как такового (рисунок 40).

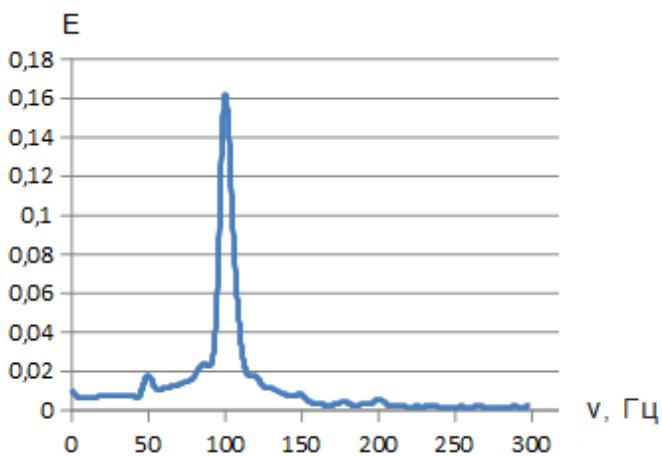


Рисунок 40 – Амплитудно-частотная характеристика двигателя без процесса горения

Можно заметить, что амплитуды всех колебаний значительно снизились, а наибольшая амплитуда колебаний наблюдается на частоте 100 Гц.

Вывод по разделу

В данном разделе, посвященном стендовым испытаниям бесклапанного эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя разработки показаны результаты определения резонансных частот двигателя при наличии и отсутствии теплоподвода. Было определено, что пульсация тяги двигателя имеет вид близкий к гармоническому колебанию. Частота пульсаций тяги и давления в камере сгорания составляет 115 Гц. Также определялась резонансная частота двигателя, продуваемого потоком воздуха, но без подачи топлива и процесса горения как такового, которая составила 100 Гц, что свидетельствует о наличии различных источников энергии и механизмов, подводящих энергию к колебательной системе эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя, поддерживающего акустические автоколебания газа.

численные газодинамические расчеты при отсутствии теплоподвода

Проведение численных газодинамических расчетов при отсутствии теплоподвода необходимо для установления процессов, происходящих в двигателе при продувке потоком воздуха без процесса горения. Для этого провели численный газодинамический расчет в проточной части двигателя с помощью программы Autodesk CFD 2019. Условия расчета следующие: постоянная скорость набегающего потока воздуха равная 60 м/с, температура воздуха равная 20 °C, без теплоподвода, поток несжимаемый, модель турбулентности $k - \varepsilon$, количество узлов – 59736, количество элементов – рисунки 41-43).

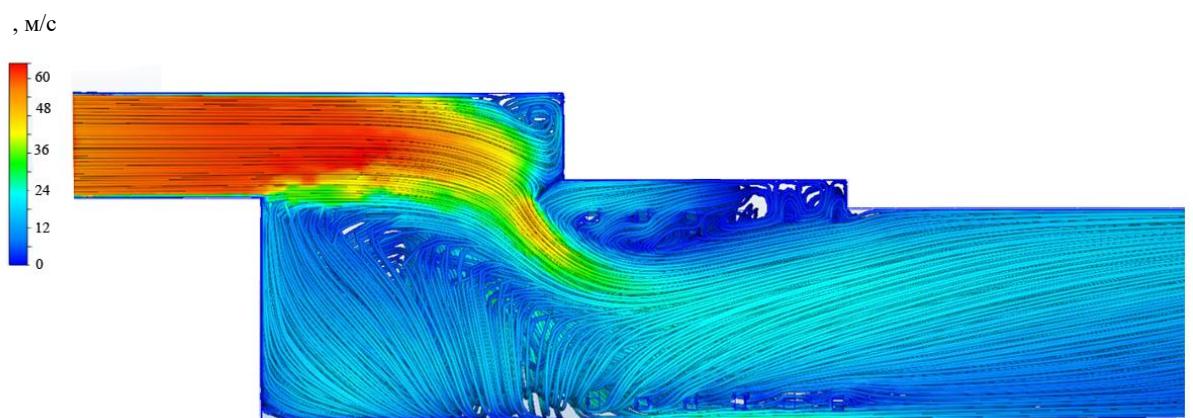


Рисунок 41 – Численный расчет ЭПуВРД, визуализация скорости воздушного потока

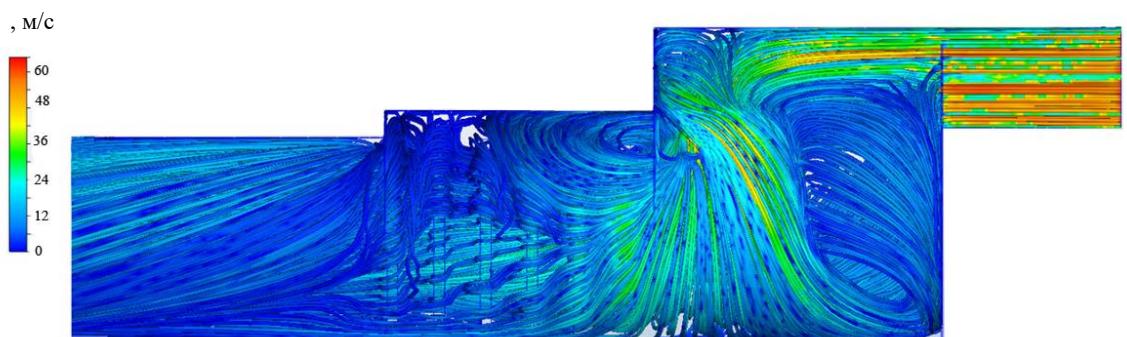


Рисунок 42 – Численный расчет ЭПуВРД, визуализация скорости воздушного потока (продолжение)

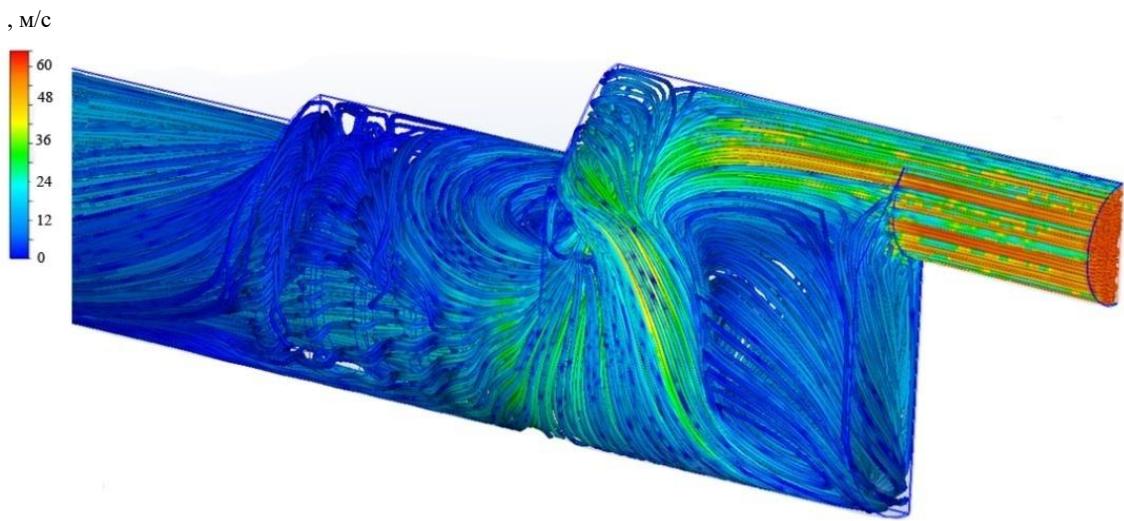


Рисунок 43 – Численный расчет ЭПуВРД, визуализация скорости воздушного потока (продолжение)

По результатам расчетов видно, что поток воздуха из второй впускной трубы втекает в камеру сгорания, где происходит его торможение на задней стенке и разделение на несколько течений. Одни течения образуют рециркуляционные зоны на стыке верхней и задней стенок камеры сгорания, где скорость не превышает 20 м/с, другие течения со скоростями около 35 м/с, огибая козырёк, движутся в резонаторную трубу. Также значительные объемы потока, минуя рециркуляционные зоны вверху камеры сгорания, движутся вдоль боковых стенок со скоростями в диапазоне от 20 до 40 м/с в нижнюю часть камеры сгорания, где происходит столкновение потоков и разворот в сторону резонаторной трубы, занимающие большую часть объема камеры сгорания. Также в области, занимаемой змеевиком, в верхней части резонаторной трубы наблюдается торможение части потока с формированием ещё одной рециркуляционной зоны.

Для того, чтобы картина газодинамических процессов была яснее, приведем следующие рассуждения, которые согласуются с проведенными численными расчетами: «Если постоянное количество газа движется по каналу переменного сечения, то скорость движения газа меняется. Связь между скоростью газа и сечением канала дается уравнением расхода, в которое входит также плотность газа. Если по каналу движется газ с малой скоростью или капельная жидкость, когда плотность можно считать постоянной, то сужение канала приводит к возрастанию скорости и наоборот.

Однако при движении газа с большими скоростями плотность его изменяется значительно и одного лишь уравнения расхода недостаточно, чтобы установить связь между площадью сечения канала и скоростью движения газа. Связь между изменением скорости и плотностью газа дается уравнением Бернулли. Таким образом, уравнение расхода и уравнение Бернулли образует систему из двух уравнений. Исключив из этих уравнений плотность, можно найти связь между скоростью газа и сечением канала.

Обозначая отношение скорости потока к скорости звука через M , получаем окончательное уравнение, связывающее изменение скорости потока с изменением сечения канала:

$$\frac{dw}{w} = \frac{\frac{df}{f}}{M^2 - 1}. \quad (21)$$

Уравнение (21) показывает (относительные изменения), что при движении газа с дозвуковой скоростью ($M < 1$) и со сверхзвуковой скоростью ($M > 1$) связь между изменением сечения потока и изменением скорости различна.

В сужающемся канале происходит ускорение дозвукового потока, а в расширяющемся – его замедление.

В соответствии с изменением скорости изменяются и другие параметры: в сужающемся канале (в сопле) по ходу газа убывает давление, а вследствие понижения температуры газа уменьшается скорость распространения звука в газе. В расширяющемся канале (диффузоре) давление, температура и скорость звука увеличиваются по ходу газа» [15].

Вывод по разделу

В данном разделе показаны результаты численных газодинамических расчетов при отсутствии теплоподвода. Установлено, что из-за возникающего увеличения сечения канала при движении воздушного потока из второй впускной трубы в камеру сгорания возникает не только снижение скорости, что мы и наблюдаем по результатам численных расчетов, но и возрастание давления в камере сгорания. Появление области с высоким давлением, и, соответственно, высоким сопротивлением движению потока приводит к тому, что воздух, продолжающий двигаться внутри первой впускной трубы, выбрасывается в атмосферу через зазор между её задним срезом и передним срезом второй впускной трубы. Количество поступающего в камеру сгорания воздуха уменьшается, давление падает до прежнего значения. Цикл повторяется. Таким образом, можно заключить, что данная конфигурация ЭПуВРД представляет собой разновидность струйного резонатора Гельмгольца.

**аналитические расчеты с использованием метода
электроакустических аналогий**

Учитывая ранее изложенные факты, для расчета резонансной частоты двигателя, предложенной конструкции, при отсутствии теплоподвода предлагается использовать метод, основанный на электроакустических аналогиях: «Элементы труб бывают обычно двух видов: участки малого поперечного сечения (открывающиеся на обоих концах в большие объёмы), которые мы будем называть сужениями, и объёмы большого поперечного сечения (сообщающиеся на обоях концах с сужениями), которые будем называть расширениями. Воздух в сужениях при движении даёт инерционную реакцию, характеризуемую массой, поэтому электрическим аналогом сужения служит индуктивность, воздух в расширениях обладает упругой реакцией, поэтому электрическим аналогом расширения является ёмкость» [13].

В данном случае сужениями будут являться вторая впускная и резонаторная трубы. Параметры первой впускной трубы учитывать не будем из-за наличия разрыва со второй впускной трубой. Сужение эквивалентно индуктивности, равной:

$$L_\alpha \cong \frac{\rho \cdot l_e}{S} \text{ г/см}^4, \quad (22)$$

где ρ – плотность среды;

S – площадь сечения сужения;

l_e – эффективная длина сужения.

Эффективная длина сужения находится по следующей формуле:

$$l_e \cong l + 0,8 \cdot \sqrt{S}, \quad (23)$$

где l – длина сужения.

Расширение эквивалентно ёмкости, равной:

$$C_\alpha \cong \frac{V}{\rho \cdot c^2} \text{ см}^4 \text{сек}^2 / \Gamma, \quad (24)$$

где V – объём расширения;

ρ – плотность среды;

c – скорость звука в среде.

Учитывая расположение сужений и расширений относительно друг друга, построим схему электрической цепи, являющейся электроакустическим аналогом двигателя, с использованием принятых условных графических обозначений элементов (рисунок 44).

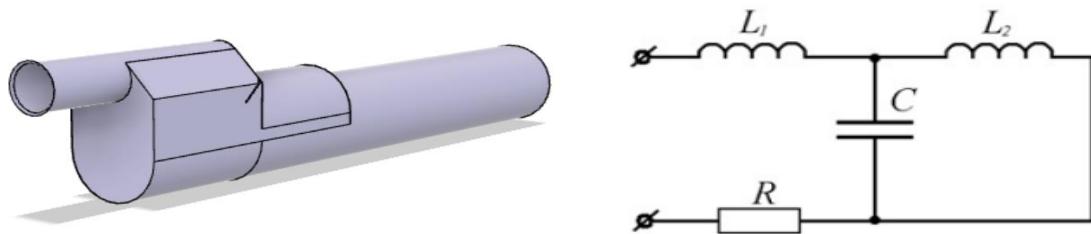


Рисунок 44 – Расчетная модель ЭПуВРД и его электроакустический аналог

Элемент R на схеме обозначает наличие акустического излучения на открытых срезах сужений, но в вычислениях не используется. Комплексное сопротивление полученной электрической цепи:

$$Z = Z_{L_1} + \frac{Z_C \cdot Z_{L_2}}{Z_C + Z_{L_2}} + R, \quad (25)$$

где Z_{L_1}, Z_{L_2} – комплексные сопротивления индуктивностей;

Z_C – комплексное сопротивление ёмкости.

Комплексные сопротивления индуктивностей и емкостей вычисляются по следующим формулам:

$$Z_L = j \cdot \omega \cdot L , \quad (26)$$

$$Z_C = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} , \quad (27)$$

где j – мнимая единица;

L – индуктивность;

C – ёмкость;

ω – циклическая частота.

Циклическая частота вычисляется по следующей формуле:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f , \quad (28)$$

где f – частота, Гц.

Так как равенство нулю мнимой части комплексного сопротивления электрической цепи является условием резонанса, резонансная частота полученной цепи после подстановки ранее упомянутых выражений для сужений и расширений вычисляется по следующей формуле:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{C} \cdot \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right)} . \quad (29)$$

Вывод по разделу

В данном разделе показаны результаты аналитических расчетов с использованием метода электроакустических аналогий. Согласно этому методу, проточная часть двигателя делится на участки малого поперечного

сечения (открывающиеся на обоих концах в большие объёмы) – сужения, и объёмы большого поперечного сечения (сообщающиеся на обоях концах с сужениями) – расширения. Воздух в сужениях при движении даёт инерционную реакцию, характеризуемую массой, поэтому электрическим аналогом сужения служит индуктивность, воздух в расширениях обладает упругой реакцией, поэтому электрическим аналогом расширения является ёмкость. Учитывая расположение сужений и расширений относительно друг друга, строится схема электрической цепи, являющаяся электроакустическим аналогом двигателя. Результаты расчета резонансной частоты исследуемого двигателя показали, что при температуре воздуха равной 20 °C она составляет 101 Гц, что достаточно хорошо коррелирует с результатами эксперимента, что подтверждает соответствие исследуемого двигателя резонатору Гельмгольца.

исленные газодинамические расчеты при наличии теплоподвода

Согласно результатам различных методов исследований, приведенных выше, существуют различные источники автоколебаний в данной конфигурации ЭПуВРД: для двигателя, обдуваемого потоком воздуха без теплоподвода, частным случаем которого является горение, это изменение площади сечения канала, по которому движется поток, и соответствующие изменения скорости и давления в потоке. В случае работающего двигателя происходит изменение резонансной частоты, обусловленное наличием теплоподвода. Вот, что пишет Б. В. Раушенбах об этом явлении: «Рэлей считал источником энергии теплоподвод, который, имея колебательную составляющую, должным образом сдвинутую по фазе относительно колебания давления, позволяет осуществляться термодинамическому циклу, дающему механическую работу. Полученная механическая энергия, поступая в колебательную систему в том же ритме, в каком осуществляется термодинамический цикл, поддерживает акустические колебания.

Приведенный ход мыслей составляет содержание так называемой гипотезы Рэлея, которая нередко кладется в основу теоретических исследований, посвященных взаимодействию теплоподвода (в частности, горения) и акустических колебаний. В последнее время Путнэм и Деннис сделали попытку доказать эту гипотезу и придать ей математическую форму. После этого стали говорить не о гипотезе, а о критерии Рэлея, который обычно формулируют так: если между колебательной составляющей теплоподвода и колебательной составляющей давления фазовый сдвиг по абсолютному значению менее $\pi/2$, в системе возбуждаются акустические колебания; если этот сдвиг заключен между $\pi/2$ и π , то акустические колебания гасятся» [24]. Таким образом, теплоподвод можно будет считать источником автоколебаний в ЭПуВРД, если будет существовать фазовый сдвиг между колебаниями

т

е

п

л

о

Для проверки этой гипотезы провели численный газодинамический расчет в проточной части двигателя с помощью пакета программ StartFlow. Для описания газодинамических процессов в расчете используются гипотезы об идеальном сжимаемом однокомпонентном теплопроводном газе. В этом случае движение газа описывается системой уравнений движения Эйлера.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0. \quad (30)$$

Уравнением баланса импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) + \nabla p - \rho \mathbf{f} = 0. \quad (31)$$

Уравнением баланса полной энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{V}) + \nabla \cdot (p \mathbf{V}) - \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V} = 0. \quad (32)$$

Уравнениями состояния и связи внутренней и полной энергии:

$$p = p(\rho, e), \quad E = \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}}{2} + e, \quad e = cT, \quad (33)$$

где ρ – плотность;

\mathbf{V} – вектор скорости;

p – давление;

e – ~~удельная кинетическая~~ удельная внутренняя энергия;

В качестве численного метода решения используется метод крупных частиц Давыдова. Теплоподвод подавался в объеме в районе расположения змеевика с частотой 100 Гц и постоянной температурой 2200 К, что соответствует температуре равной 1200 °C, которая является реальной температурой горения при продувке двигателя со скоростью 60 м/с (рисунки

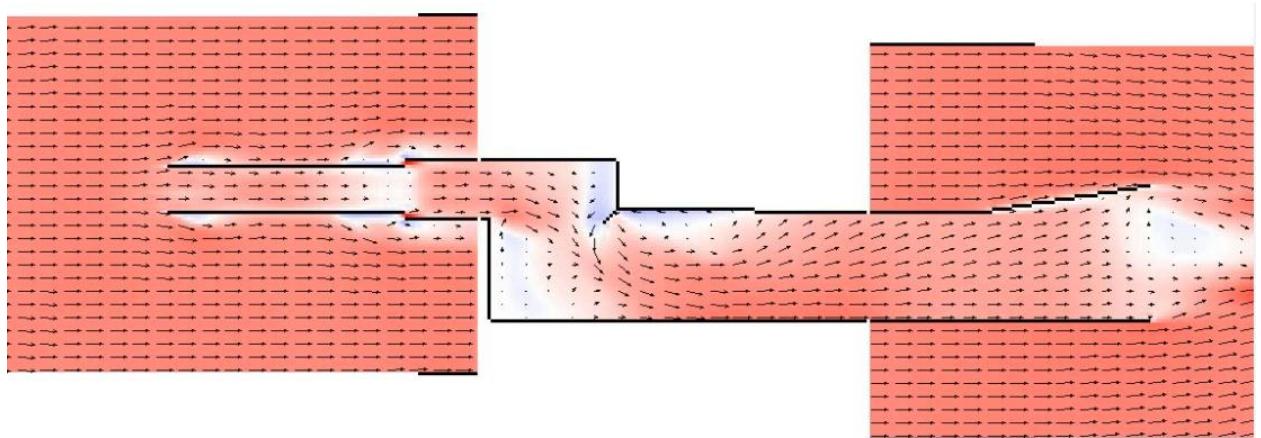


Рисунок 45 – Численный расчет ЭПуВРД, визуализация скорости и давления воздушного потока, вид сбоку изнутри, начало цикла

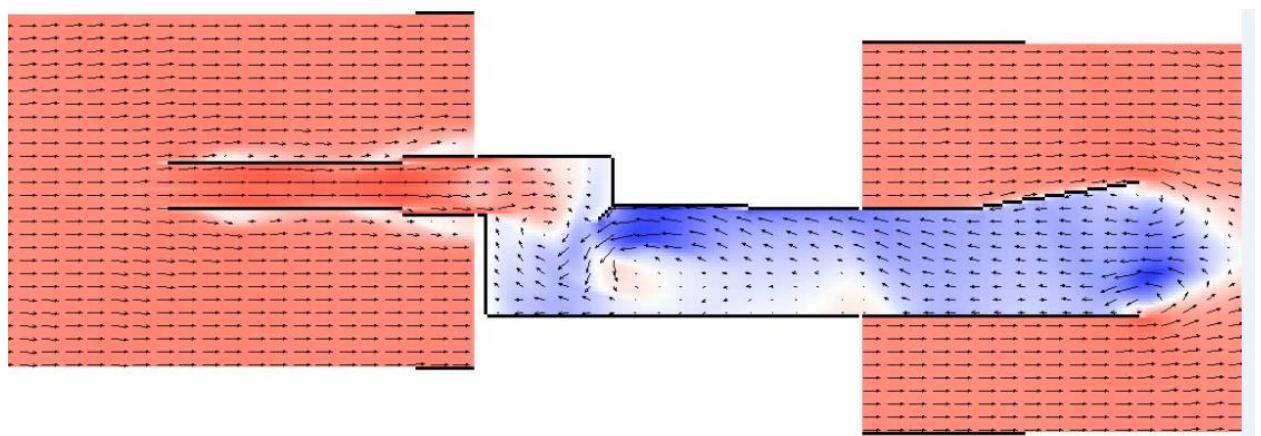


Рисунок 46 – Численный расчет ЭПуВРД, визуализация скорости и давления воздушного потока, вид сбоку изнутри, конец цикла

На представленных рисунках красным цветом обозначены объёмы потока с высокой скоростью и низким давлением, а синим – с низкой скоростью и высоким давлением. Стрелками показано направление движения потока. По ним можно видеть, что в конце цикла после окончания процесса горения давление в камере сгорания становится ниже атмосферного, что также видно на рисунке 47, на котором представлен график изменений давления и температуры во времени.

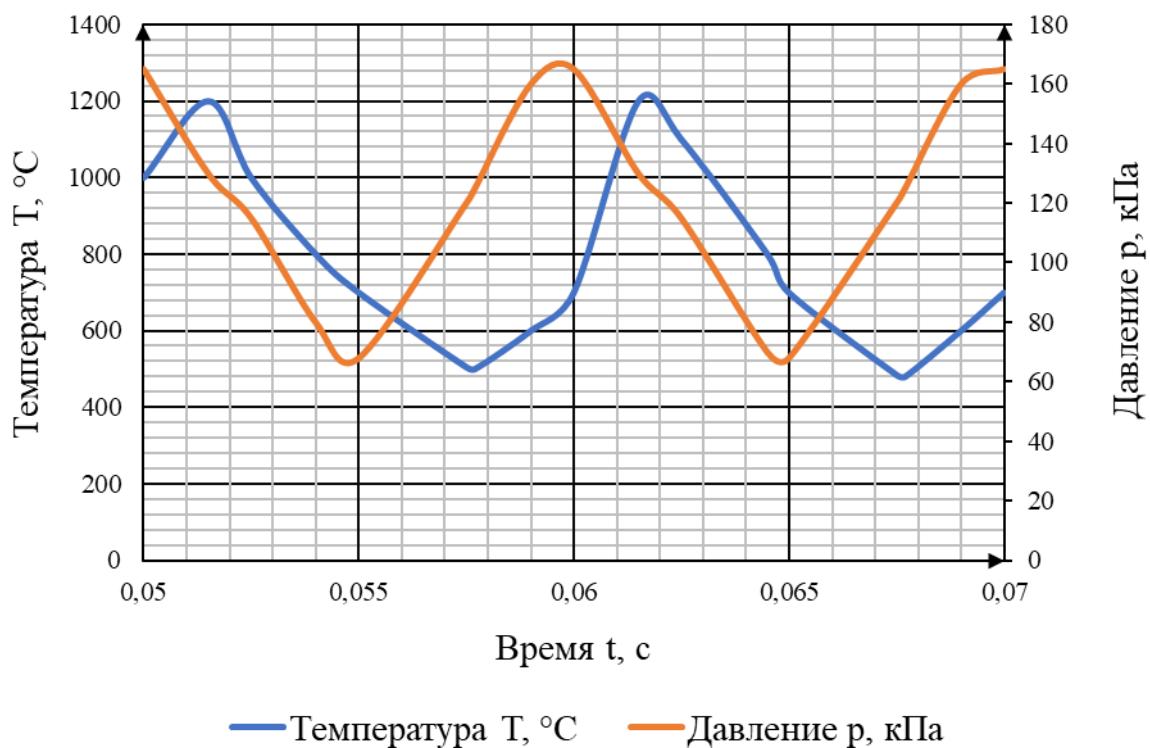


Рисунок 47 – График изменений давления и температуры во времени

Вывод по разделу

В данном разделе показаны результаты численных газодинамических расчетов при наличии теплоподвода. Установлено, что фазовый сдвиг между колебаниями теплоподвода и давления действительно составляет менее $\pi/2$, что подтверждает предположение о том, что источником автоколебаний в работающем двигателе является теплоподвод. Различие же резонансных частот работающего двигателя и обдуваемого потоком воздуха без теплоподвода, наблюдаемое экспериментально, может истолковываться следующей гипотезой, выдвинутой Б. В. Раушенбахом: «Колебательная система стремится реализовать такой механизм возбуждения и такие амплитудные и фазовые соотношения, которые в конкретных условиях опыта дают максимум величины акустической энергии, излучаемой областью горения, за вычетом потерь» [24].

Заключение

В ходе выполнения работы были определены следующие источники автоколебаний в данной конфигурации ЭПуВРД: для двигателя, обдуваемого потоком воздуха без теплоподвода, частным случаем которого является горение, это изменение площади сечения канала, по которому движется поток, и соответствующие изменения скорости и давления в потоке. Для работающего двигателя источником автоколебаний является теплоподвод.

В первом разделе были рассмотрены пульсирующие воздушно-реактивные двигатели различных конфигураций. Были описаны их конструктивные особенности, преимущества и недостатки. Разнообразие конфигураций пульсирующих воздушно-реактивных двигателей, имеющих значительные отличия в конструкции, свидетельствует об отсутствии единой методики разработки двигателей данного типа.

Во втором разделе, посвященном стендовым испытаниям бесклапанного эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя, показаны результаты определения резонансных частот двигателя при наличии и отсутствии теплоподвода. Было определено, что пульсация тяги двигателя имеет вид близкий к гармоническому колебанию. Частота пульсаций тяги и давления в камере сгорания составляет 115 Гц. Также определялась резонансная частота двигателя, продуваемого потоком воздуха, но без подачи топлива и процесса горения как такового, которая составила 100 Гц, что свидетельствует о наличии различных источников энергии и механизмов, подводящих энергию к колебательной системе эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя, поддерживающего акустические автоколебания газа.

В третьем разделе показаны результаты численных газодинамических расчетов при отсутствии теплоподвода. Установлено, что из-за возникающего увеличения сечения канала при движении воздушного потока из второй впускной трубы в камеру сгорания возникает не только снижение скорости,

что мы и наблюдаем по результатам численных расчетов, но и возрастание давления в камере сгорания. Появление области с высоким давлением, и, соответственно, высоким сопротивлением движению потока приводит к тому, что воздух, продолжающий двигаться внутри первой впускной трубы, выбрасывается в атмосферу через зазор между её задним срезом и передним срезом второй впускной трубы. Количество поступающего в камеру сгорания воздуха уменьшается, давление падает до прежнего значения. Цикл повторяется. Таким образом, можно заключить, что данная конфигурация ЭПуВРД представляет собой разновидность струйного резонатора Гельмгольца.

В четвертом разделе показаны результаты аналитических расчетов с использованием метода электроакустических аналогий. Согласно этому методу, проточная часть двигателя делится на участки малого поперечного сечения (открывающиеся на обоих концах в большие объёмы) – сужения, и объёмы большого поперечного сечения (сообщающиеся на обоях концах с сужениями) – расширения. Воздух в сужениях при движении даёт инерционную реакцию, характеризуемую массой, поэтому электрическим аналогом сужения служит индуктивность, воздух в расширениях обладает упругой реакцией, поэтому электрическим аналогом расширения является ёмкость. Учитывая расположение сужений и расширений относительно друг друга, строится схема электрической цепи, являющаяся электроакустическим аналогом двигателя. Результаты расчета резонансной частоты исследуемого двигателя показали, что при температуре воздуха равной 20°C она составляет 101 Гц, что достаточно хорошо коррелирует с результатами эксперимента, что подтверждает соответствие исследуемого двигателя резонатору Гельмгольца.

В пятом разделе показаны результаты численных газодинамических расчетов при наличии теплоподвода. Установлено, что фазовый сдвиг между колебаниями теплоподвода и давления действительно составляет менее $\pi/2$, что подтверждает предположение о том, что источником автоколебаний в работающем двигателе является теплоподвод.

Список используемой литературы

атчик силоизмерительный тензорезисторный ДСТ 9035. – [1] с. – (Информ. листок).

игалин, К. В. О механизмах инициирования пульсирующего горения в бесклапанном эжекторном двухконтурном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2022. – № 3. – С. 119-125.

игалин, К. В. О механизме аэроакустического инициирования пульсирующего квазидетонационного горения в эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко // Горение и взрыв. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 88-99.

игалин, К. В. О разработке воздушно-реактивного двигателя, реализующего цикл горения, приближенный к детонационному / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко // Горение и взрыв. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 29-37.

игалин, К. В. Прецессия внутренней отрывной зоны как источник инициирования детонационного или квазидетонационного горения в пульсирующем эжекторном воздушно-реактивном двигателе / К. В. Мигалин, И. П. Бойчук, К. А. Сиденко // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2021. – № 3. – С. 113-118.

игалин, К. В. Улучшение удельных показателей эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя за счет сдвига зоны горения / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2023. – № 1. – С. 89-92.

игалин, К. В. Форсирование процесса горения в эжекторном двухконтурном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2022. – № 1. – С. 152-157.

игалин, К. В. Частичная конверсия топлива как способ интенсификации процесса горения в эжекторном двухконтурном пульсирующем воздушно-

реактивном двигателе / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко // Горение и взрыв. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 87-96.

игалин, К. В. Эжекторные двухконтурные пульсирующие воздушно-реактивные двигатели для около и сверхзвуковых скоростей полёта / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко, К. К. Мигалин. – Тольятти : СПЕКТ, 2021. – 150 с.

игалин, К. В. Эжекторные двухконтурные пульсирующие воздушно-реактивные двигатели для около и сверхзвуковых скоростей полёта. Туннельные двигатели : Монография / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко, К. К. Мигалин. – Тольятти : Спект, 2022. – 200 с.

игалин, К. В. Эжекторные пульсирующие воздушно-реактивные двигатели / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко, К. К. Мигалин. – Тольятти : СПЕКТ, 2020. – 456 с.

игалин, К. В. Эжекторные пульсирующие воздушно-реактивные двигатели для около и сверхзвуковых скоростей полёта. Численные расчёты рабочего процесса / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко, К. К. Мигалин. – Тольятти : Спект, 2024. – 268 с.

орз Ф. Колебания и звук. М. - Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. - 497 с.

возможности использования эжекторного ПуВРД в качестве двигателя для лёгких сверхзвуковых летательных аппаратов / В. В. Бирюк, К. В. Мигалин, К. А. Сиденко, Ю. И. Цыбизов // Перспективы развития двигателестроения : материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, Самара, 21–23 июня 2023 года / Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. Том 2. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. – С. 261-262.

сновы термодинамики, газовой динамики и теплопередачи : [Учеб. пособие для авиац. техникумов] / С. И. Исаев, Б. М. Миронов, В. М. Никитин, В. И. Хвостов ; Под общ. ред. В. И. Хвостова. - Москва : Машиностроение, 1968. - 275 с.

форсирования двухконтурного эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя и форсированный двухконтурный эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель : № 2019122063 : заявл. 10.07.2019 : опубл. 17.02.2020 / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко.

атент № 2749083 С1 Российская Федерация, МПК F02K 7/06. Двухконтурный эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель : № 2020120628 : заявл. 16.06.2020 : опубл. 03.06.2021 / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко, А. И. Сиденко, К. К. Мигалин.

атент № 2754796 С1 Российская Федерация, МПК F02K 7/06. Способ форсирования двухконтурного эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя и форсированный двухконтурный эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель : № 2020134342 : заявл.

атент № 2760339 С1 Российская Федерация, МПК F02K 7/02, F02K 7/067. Способ форсирования двухконтурного эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя и форсированный двухконтурный эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель : № 2021102959 : заявл. 08.02.2021 : опубл. 24.11.2021 / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко, К. К. Мигалин.

атент № 2760340 С1 Российская Федерация, МПК F02K 7/067. Форкамерный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель : № 2021102960 : заявл. 08.02.2021 : опубл. 24.11.2021 / К. А. Сиденко.

атент № 2765672 С1 Российская Федерация, МПК F02K 7/067. Способ форсирования двухконтурного эжекторного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя и форсированный двухконтурный эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель : № 2020141237 : заявл. 14.12.2020 : опубл. 01.02.2022 / К. В. Мигалин, К. А. Сиденко, К. К. Мигалин. Ерспективы двигателей пульсирующего горения в современной авиации / К. В. Мигалин, И. П. Бойчук, А. Г. Егоров, К. А. Сиденко // Тезисы XVI Всероссийского симпозиума по горению и взрыву : Тезисы докладов, Сузdalь,

04–09 сентября 2022 года. – Черноголовка: Институт проблем химической физики РАН, 2022. – С. 224-226.

реобразователи термоэлектрические. Руководство по эксплуатации. – Москва, 2021. – [57] с. – (Информ. листок).

аушенбах Б. В. Вибрационное горение. - М.: Физматгиз, 1961. - 500 с.

ифровой многоканальный самописец «S-Recorder-E». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Москва. – [82] с. – (Информ. листок).

26. Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated. – 2012. – [24] с. – (Информ. листок).

27. Jet Propulsion. – California Institute of Technology, Pasadena. – 1946. – [22] с. – (Информ. листок).

28. Migalin, K. V. Improvement of Power Density of an Ejector Pulse Air-Jet Engine by Shifting the Combustion Zone / K. V. Migalin, K. A. Sidenko // Russian Aeronautics. – 2023. – Vol. 66, No. 1. – P. 94-98.

29. Migalin, K. V. On the Mechanisms of Pulsed Combustion Initiation in a Valveless Ejector Bypass Pulsed Air-Jet Engine / K. V. Migalin, K. A. Sidenko // Russian Aeronautics. – 2022. – Vol. 65, No. 3. – P. 568-574.

30. The Pulsejet Engine – A Review Of Its Development Potential. – 1974. – [121] с. – (Информ. листок).