



УДК 533.915 + 531.6.02.01

**НЕИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ ГАЗА
В ПОРШНЕВЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ.**

специальность 01-02.05

механика газа, жидкости и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико – математических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
старший научный сотрудник
Кислых В.В.

Домопрудный Моск обл. — 1995 г.

Работа выполнена в Центральном Научно – Исследовательском
Институте Машиностроения
(Калининград Моск. обл.) и

Институте Газовой Механики (Геттинген,
Германия) (Institute for Fluid Mechanics,
Aerothermodynamics Branch, DLR, Germany)

Научный руководитель – кандидат технических наук
старший научный сотрудник
Кислых Виталий Владимирович

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук
Фомин Виктор Николаевич
(НПО “Энергия”)

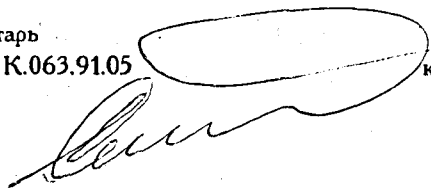
кандидат физико-математических наук
Виноградов Вячеслав Афанасьевич
(Центральный институт авиационного
моторостроения)

Ведущая организация – Центральный аэрогидродинамический институт
им. Жуковского

Защита диссертации состоится 16.01.95 на заседании Спец. Совета
К.063.91.05 при МФТИ в 10⁰⁰ часов
по адресу: 141700 г. Долгопрудный Моск.об
Институтский пер., д.9, ФАКИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФАКИ МФТИ.
Автореферат разослан 10.11.95

Ученый секретарь
Спец. Совета К.063.91.05  к.т.н. Смоляков К.Г.



Цель работы состоит в исследовании, развитии и оптимизации неизэнтропического способа сжатия газа в поршневых газодинамических установках для получения плотного высокотемпературного газа, а так же в обобщении опыта экспериментальной отладки этой технологии в У-11.

Актуальность и практическая значимость работы определяются с одной стороны, современными требованиями к наземной отработке перспективных аэрокосмических систем — необходимостью одновременного моделирования нескольких параметров обтекания, близких к натурным, а с другой стороны, невозможностью удовлетворить этим требованиям, используя классические аэродинамические установки. За рубежом сейчас активно вводятся в эксплуатацию ударные трубы с поршневым приводом. Настоящая работа посвящена альтернативному пути развития установок такого типа, развитому в ЦНИИМаш в период 80—90 гг.

Новизна работы состоит в следующем. В 1980 г. В.В.Кислых предложил технологию многокаскадного неизэнтропического сжатия газа в поршневых газодинамических установках (ПГУ), которая в дальнейшем была внедрена на установках У-7, У-11 ЦНИИМаш. Развитие и внедрение этой технологии потребовало исследования физических процессов, имеющих место при неизэнтропическом сжатии газа, чему и посвящена данная работа.

На защиту выносятся:

1. Технология управления энтропией газа высокого давления в ПГУ
2. Методика оптимизации сжатия газа в стволе ПГУ при ограниченном предельном давлении, критерий оптимальности агрегата сжатия ПГУ.
3. Методика выбора конструкций емкостей и клапанов форкамеры ПГУ для высокотемпературных режимов.
4. Применение в высокотемпературных кратковременных режимах ПГУ одной удлиненной емкости форкамеры вместо нескольких малого удлинения.

5. Отработанная технология работы механического плазмотрона ПГУ У-11 по способу неизэнтропического сжатия.

6. Характерная связь параметров M , Re_1 , T_w/T_0 для промышленных режимов неизэнтропического сжатия азота в ПГУ У-7, У-11.

7. Принцип использования неизэнтропического многокаскадного сжатия газа в электроразрядных плазмотронах, в метательных установках, а также для создания сверхзвуковой аэродинамической установки импульсного типа без подогревателей газа.

8. Рассчитанный режим работы поршневой ударной трубы НЕС в Геттингене (Германия) как трубы Людвига с поршневым приводом, предназначенный для создания потоков газа с высоким числом Рейнольдса.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и графических материалов. Работа изложена на 130 страницах, включает 50 графиков.

В первой главе рассмотрены современные требования к наземной экспериментальной базе гиперзвуковой аэрогазодинамики, в частности — для создания воздушно — космических самолетов.

В п. 1.1 из анализа траекторий полета перспективных аппаратов типа Гермес, Зенгер, НАСП сделан вывод о необходимости моделирования числа Маха M потока в диапазоне 6 — 25, числа Re_1 от 10^5 до $5 \cdot 10^8$, температурного фактора T_w/T_0 от 0.3 до 1. Анализ литературных источников показал, что для достоверных аэродинамических испытаний на гиперзвуке модели длиной порядка 1 м достаточно продолжительности эксперимента порядка нескольких миллисекунд.

В п. 1.2 перечислены классические аэродинамические установки кратковременного действия, находящиеся в эксплуатации.

В п. 1.3 представлены пять современных установок, составляющих основу зарубежной гиперзвуковой экспериментальной базы. Эти крупномасштабные ударные трубы с поршневым сжатием толкающего газа (Free — Piston Shock Tunnel) обеспечивают энтальпию торможения газа до 30 МДж/кг при длительности эксперимента порядка 2 мсек.

Во второй главе рассмотрены физические явления, имеющие место при наполнении емкостей форкамеры сжатым газом из ствола ПГУ.

В п. 2.1 повторен математический вывод соотношений для перетекания газа между камерами в термодинамическом приближении, известный в литературе, и проведен детальный анализ всех вариантов перетекания, характерных для ПГУ.

В п. 2.2 предложена физическая модель процесса квазиравновесного наполнения емкости газом. Показано, что в наполняемой камере удельная энтропия газа возрастает благодаря его перемешиванию, при этом температура газа в ней в каждый момент времени равна умноженному на γ среднему от температуры в камере истечения по перетекшему количеству газа. Запатентованные конструкции электроразрядного плазмотрона и сверхзвуковой беспоршневой установки демонстрируют универсальность неизэнтропического способа увеличения температуры газа. Определены условия медленности процессов наполнения, показано, что они эквивалентны условию малости площади отверстия между камерами по отношению к площади поперечного сечения последних.

В п. 2.3 рассмотрены закономерности наполнения газом удлиненной камеры (при отсутствии перемешивания). Предложенная приближенная модель процесса, согласно которой порции газа адиабатически сжимаются от того давления, что было в момент втекания, до конечного, позволила определить профиль температуры газа по длине камеры сразу после наполнения:

$$T/T_0 = (1 - x/l)^{1-\gamma}$$

Отмечено, что среднемассовая температура такого распределения равна γT_0 . Исходя из этого, а также из экспериментальных данных, представленных в литературе, сделан вывод, что при наполнении удлиненной емкости (при ограниченном перемешивании) температура газа возрастает от температуры втекающего в отверстие газа до максимальной величины γ противоположной стенки. С течением времени благодаря перемешиванию температура газа по всей емкости

приближается к среднemasсовой, которая больше исходной примерно в γ раз (в отсутствие тепловых потерь.)

П. 2.4 посвящен случаю наполнения емкости, противоположному квазиравновесному, а именно: газодинамическому анализу наполнения "одномерной" камеры из резервуара, когда ее диаметр равен диаметру входного отверстия. Расчет методом характеристик показал, что свободно расширяющийся в камеру газ практически останавливается отраженной от ее конца ударной волной переменной интенсивности, а давление газа за ней близко к исходному давлению покоящегося газа в резервуаре. Температура газа максимальна у дальнего от отверстия конца трубы. Таким образом, в "одномерной" емкости неизэнтропический нагрев газа обусловлен отраженной ударной волной, а не процессом смещения, как в предыдущем случае.

В п. 2.5 из анализа термодинамического цикла сжатия газа поршнем сделан вывод об оптимальном способе сжатия при ограниченном предельном давлении в установке. Отмечено, что вкладываемая в газ энергия возрастет при этом примерно в γ раз.

В п. 2.6 разработан способ работы управляемого клапана ПГУ для реализации указанного оптимального сжатия, а также выведен универсальный критерий, которому должен удовлетворять агрегат сжатия любой поршневой установки:

$$F_k \approx 2 \sqrt{\frac{m_g}{m_p}} F_p$$

где F_k — площадь сечения клапана, F_p — площадь поперечного сечения поршня, m_g — масса газа, m_p — масса поршня.

В п. 2.7 рассмотрен вопрос об оптимальном выборе емкостей форкамеры для высокотемпературных режимов. Результатом такого способа сжатия является распределение газа по емкостям форкамеры, при котором в первой емкости температура газа равна достигнутой в стволе, далее увеличивается в $\approx \gamma$ раз в каждой камере вплоть до максимального значения в предсопловой емкости при близких уровнях давления в камерах.

В п. 2.8 проведен анализ различных способов сжатия газа в установках адиабатического сжатия, ударных трубах, легкопоршневых установках и трубах Сталкера. Показано, что в ПГУ удалось в одной установке соединить преимущества равновесного сжатия газа до высоких плотностей с неизэнтропическим нагревом. Рассмотрены варианты применения неизэнтропического сжатия легкого газа в баллистических установках.

В третьей главе разработана методика компьютерного моделирования процессов в ПГУ.

В п. 3.1 из законов сохранения массы и энергии осуществлен вывод дифференциальных уравнений, описывающих процессы в камерах ПГУ в квазистатическом приближении с учетом перетекания газа, его реальных свойств и тепловых потерь.

В п. 3.2 проведено сравнение расчетов с результатами экспериментов на ПГУ У-7.

В п. 3.3 изучено влияние тепловых потерь от газа к стенкам камер на максимальные параметры газа. Проведено компьютерное моделирование неизэнтропического сжатия инертных газов в механическом плазмотроне У-11, определены режимы установки для получения низкотемпературной плотной плазмы с температурой ≈ 8000 К и давлением ≈ 10 атм без теплового повреждения элементов конструкции.

В п. 3.4 выведены дифференциальные соотношения для оптимального сжатия газа в стволе ПГУ по методике п.2.5 - 2.6. Произведен расчет такого сжатия в установке RHYFL (США) для определения максимальных параметров газа при использовании неизэнтропического сжатия.

В п. 3.5 рассмотрен вопрос о работе управляемых клапанов с целью осуществления оптимального неизэнтропического сжатия в емкостях форкамеры по методике п.2.7. Построена и исследована модель втекания газа в камеру, объединяющая наполнение ее с ростом температуры и последующее вытеснение газа с постоянной температурой. Получены характерные режимы работы управляемых клапанов.

В четвертой главе рассмотрены разработанные промышленные режимы неизэнтропического сжатия газа в ПГУ У-7, У-11.

В п. 4.1 проведено компьютерное моделирование работы основного элемента ПГУ У-11 — управляемого клапана, сделаны выводы по необходимой доработке его для работы в магистрали подачи воздуха в импульсную трансзвуковую трубу. Показано, что при проведении экспериментов по изучению эжекционного воздействия струй двигателей на внешнее обтекание модели 1/50 "Энергия" запорно — регулирующей клапан управляет подачей воздуха в ИТТ У-11 с расходом до 100 кг/сек, обеспечивая число Маха у модели 0.2 и 0.6.

В п. 4.2 представлены результаты расчетов сжатия различных газов в механическом плазмотроне У-11, а также экспериментальные данные по сжатию гелия и азота. Показано, что в ходе первой серии экспериментов по получению низкотемпературной плотной плазмы была отлажена технология работы плазмотрона ПГУ У-11 по способу неизэнтропического сжатия газа.

В п. 4.3 проведен анализ промышленных режимов неизэнтропического сжатия азота в ПГУ У-7, У-11, на которых проводились исследования моделей аппаратов Гермес, Зенгер и других. Показано, что в разработанных режимах степень изменения энтропии S потока

$$\chi = \exp(\Delta S / C_v),$$

где C_v — удельная изохорная теплоемкость газа, составляет 4—8. Отмечено, что характерной особенностью сверхзвукового потока, генерируемого по способу неизэнтропического сжатия, является запаздывание по времени максимума полного давления от максимума температуры торможения. Проанализированы следующие из этого характерные зависимости чисел Маха, Рейнольдса, температурного фактора для рассматриваемых режимов.

Пятая глава посвящена разработке принципиально нового режима работы крупномасштабной ударной трубы с поршневым приводом НЕГ в Геттингене (Германия).

В п. 5.1 показано, что работа установки НЕГ в режиме трубы Лидвига со свободным поршнем позволила бы реализовать не только

высокоэнтальпийные кратковременные потоки газа, но и длительные течения с низкой Энтальпией (высоким числом Рейнольдса).

В п. 5.2 разработана методика компьютерного моделирования нового режима установки НЭГ, объединяющая классический способ расчета НЭГ с принципами расчета ПГУ У-7, У-11.

В п. 5.3 известный способ расчета одномерных нестационарных течений газа — метод характеристик — дополнен соотношениями, позволяющими просчитывать резкие изменения сечений труб и дроссели. Показано, что максимальное число Маха выше по течению от сужения трубы, при котором последняя "запирается", зависит лишь от геометрических характеристик и показателя адиабаты газа.

В п. 5.4 рассмотрена процедура калибровки двух разработанных методик компьютерного моделирования по экспериментам НЭГ.

В п. 5.5 показано, что невозможно изэнтропически сжать газ в объединенной емкости ударной трубы* и ствола из-за запираания последнего. В предложенном компромиссном режиме работы при максимальном давлении воздуха в стволе 2000 атм в емкости трубы Людвига давление составит лишь 700 атм при температуре 1300 К. Энтропия сжатого газа будет выше исходного уровня из-за образования ударных волн при заполнении трубы. Сделан вывод о необходимости введения регулируемой задержки момента пуска потока из трубы Людвига для затухания газодинамических возмущений в ней. Проведена оценка влияния тепловых потерь на параметры торможения газа.

В п. 5.6 рассчитаны параметры потока воздуха, который возможно получить в разработанном новом режиме установки НЭГ:

$$Re_1 \approx 1 \cdot 10^8 \text{ при } M = 6,$$

$$Re_1 \approx 3 \cdot 10^7 \text{ при } M = 10.$$

В заключении сформулированы основные выводы по диссертации.

В данной работе собран и проанализирован материал за 1986 — 1995 годы. За этот период автором были опубликованы в стране и за рубежом следующие работы:

1. Кислых В.В., "Использование неизоэнтропического многокаскадного сжатия для получения плотного высокотемпературного газа", Теплофизика высоких температур, т. 28, N 6, 1990. Перевод: Kisylykh V.V., Krapivnoy K.V., "Nonisentropic multistage compression in producing a dense hot gas", High Temperature, May 1991, p. 918.

2. Anfimov N.A., Kisylykh V.V., "Nonisentropic multicascade gas compression in piston gasdynamic units (PGU) U-11 and RHYFL. Development outlook", Zeitschrift für Flugwissenschaften und Weltraumforschung, N 16, 1992, p. 169.

3. Anfimov N.A., Kisylykh V.V., "Harnessing Nitrous Oxide for Elevation of Temperature and Pressure in Piston Facilities", AIAA 93-2016, 26th Joint Propulsion Conference and Exhibit, June 28-30, 1993, Monterey, CA.

4. Kisylykh V.V., "Nonisentropic gas compression using in Piston Gasdynamic Unit for ground testing of perspective aerospace vehicles", Международная конференция "Космонавтика - XXI век", 1-7.09.91.

5. Eitelberg G. E., "Development of a new regime at the HEG facility - operation as a free - piston driven Ludwig Tunnel", DLR IB 223 - 94 A 18, May 1994.

6. Кислых В.В., "Генератор плотной низкотемпературной плазмы на базе поршневой газодинамической установки", IV Всесоюзная конференция "Кинетические и газодинамические процессы в неравновесных средах", МГУ, 1988.

7. "Разработка мощного источника плотной низкотемпературной плазмы на базе поршневой газодинамической установки", XIV конф. ЦНИИМаш "Теоретические и экспериментальные исследования по аэродинамике", 1988.

8. Кислых В.В., "Высокотемпературные режимы поршневых газодинамических установок", сборник ПГУ, 1988.

9. "Использование неизоэнтропического наполнения дивергентной емкости с целью высокоскоростного метания", тезисы доклада на межотраслевой конференции, 1990.

10. Кислых В.В., "Способ электроразрядного импульсного нагрева газа", заявка N 4864930/25 от 16.07.90.

11. Кислых В.В., "Сверхзвуковая аэродинамическая установка", заявка N 4864929/23 от 16.07.90, положительное решение.

12. Кислых В.В., Пучков В.В., "Способ адиабатического сжатия газа", заявка N 4495871/23 от 20.10.88, положительное решение.

13. Кислых В.В., "Способ адиабатического сжатия газа в аэродинамической установке", заявка N 4942658/23 от 05.06.91, положительное решение.

14. Кислых В.В., "Метательная многоступенчатая поршневая установка", заявка N 4696375/23 от 29.05.89, положительное решение.

15. Кислых В.В., "Метательная многоступенчатая поршневая установка", заявка N 4855112/23 от 31.07.90, положительное решение.

16. Кислых В.В., Пучков В.В., "Способ адиабатического сжатия газа", заявка N 4893924/23 от 29.12.90, положительное решение.

17. Кислых В.В., Петрова О.В., Шестаков Ю.Н., "Запорно-регулирующее устройство поршневой газодинамической установки", заявка от 06.08.93.

МФТИ. Подписано к печати 15.06 95
Тираж 100 экз. Заказ N 847