

УДК 533.17

Расчет втекания газа в вакуумную емкость^{*}

В.И. Звегинцев, С.В. Лукашевич

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: zvegin@itam.nsc.ru, lukashevich@itam.nsc.ru

На основе гипотезы квазистационарности получены соотношения для расчета нестационарного процесса заполнения вакуумной емкости. В качестве критерия окончания процесса заполнения принимается допустимая степень повышения давления в вакуумной емкости. Выполнен анализ возможностей увеличения продолжительности процесса заполнения вакуумной емкости при ее заданном объеме.

Ключевые слова: газодинамические нестационарные процессы, вакуумная емкость, заполнение, повышение давления, квазистационарность.

Введение

Вакуумные емкости различной конструкции используются во многих технических установках для накопления рабочего газа при заданном давлении или создания необходимого перепада давлений. Правильный подход к выбору параметров вакуумной емкости (таких как ее объем, минимальное давление, скорость откачки) имеет чрезвычайно большое значение при разработке подобных установок. Очевидно, что заполнение вакуумной емкости ограниченного объема приводит к непрерывному повышению давления в ней и, в конце концов, к прекращению процесса втекания. Как правило, в технических задачах требуется увеличить продолжительность рабочего режима установки, что чаще всего обеспечивается за счет увеличения объема вакуумной емкости. Однако вакуумная емкость — это наиболее громоздкая часть установки, а обслуживающая ее система вакуумных насосов довольно энергоемка и сложна в эксплуатации. Поэтому простое увеличение объема представляет собой сложную техническую проблему. Реальную продолжительность рабочего режима рассматриваемой установки, помимо конструктивных ограничений, определяет газодинамическая картина втекания в вакуумную емкость и скорость увеличения давления в ней. Согласование изменяющихся в общем случае параметров втекающего рабочего газа и изменяющихся параметров неподвижного газа в вакуумной емкости представляет собой определенную аэродинамическую проблему. Однако до настоящего времени вопрос о газодинамических процессах при заполнении

^{*} Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 21-19-00393).

вакуумной емкости — важного и наиболее объемного элемента аэродинамической установки — остается малоизученным [1, 2]. Вопросы выбора и согласования параметров вакуумной емкости для аэродинамических установок практически не рассматриваются в научной литературе. Известно весьма ограниченное число работ, посвященных экспериментальному исследованию задачи согласования втекающего рабочего потока с параметрами газа в вакуумной емкости, и практически отсутствуют прямые экспериментальные данные по заполнению вакуумной емкости. Целью настоящей работы является исследование газодинамических проблем, вызванных ограничением объема вакуумной емкости, и методов повышения эффективности использования вакуумной емкости с точки зрения увеличения продолжительности рабочего режима.

1. Постановка задачи

Задачу о втекании газа в вакуумную емкость можно представить в виде следующей схемы, изображенной на рис. 1. Рассматривается система, состоящая из двух сосудов (источника рабочего газа и вакуумной емкости) с заданными объемами, заполненных газом одинакового состава, но с разными начальными параметрами. Нижние индексы обозначают следующее: C — параметры газа в источнике рабочего газа, V — параметры газа в вакуумной емкости. Соединяющий эти сосуды трубопровод в виде сопла с минимальным критическим сечением F^* мгновенно открывается в некоторый момент времени $t(0) = 0$, принятый за начало процесса. После открытия сопла начинаются два взаимосвязанных процесса: истечение газа из источника и заполнение этим газом вакуумной емкости. Требуется рассчитать изменение параметров газа (давление и температуру) по времени в каждом из сосудов. Частным случаем рассматриваемой задачи является втекание газа из источника бесконечного объема ($V_C = \infty$) с постоянными параметрами газа.

Само по себе перетекание газа из одной емкости в другую представляет достаточно сложное нестационарное пространственно-временное явление, сопровождающееся волновыми процессами, трением, теплообменом, изменением теплофизических свойств рабочего газа. Решение нестационарной задачи в этом случае является достаточно трудным. Для её упрощения используется гипотеза квазистационарности, которая предполагает стационарность параметров процесса в любой отдельно взятый момент времени, но допускает смену состояний между рассматриваемыми моментами. Конструкция тракта аэродинамической установки разбивается на ряд последовательно расположенных камер («сосредоточенных объемов») и считается, что параметры газа переменны по времени, но одинаковы по всему объему каждой камеры в заданный момент времени [3]. При таком подходе общая картина течения в рассматриваемый момент времени считается стационарной, затем для следующего момента времени характерные параметры процесса в каждой камере мгновенно меняются и течение опять считается стационарным, но с другими параметрами. Применительно к газовому потоку условие квазистационарности эквивалентно предположению, что скорость распространения возмущений по выделенному объему значительно превосходит скорость изменения параметров в этом объеме.

Использование гипотезы квазистационарности позволяет существенно упростить расчет параметров течения по тракту установки кратковременного действия. В частности,

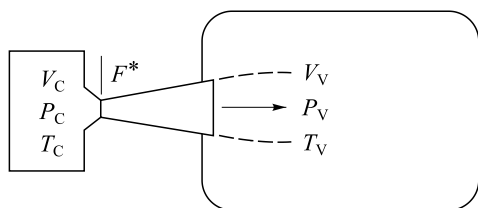


Рис. 1. Расчетная схема заполнения вакуумной емкости.

могут использоваться обычные изоэнтропические соотношения для расчета параметров газа в различных точках потока.

В рассматриваемом случае подход к решению задачи о перетекании газа основывается на следующих упрощающих предположениях:

- процесс перетекания считается квазистационарным: параметры газа в каждый момент времени одинаковы по объему каждой емкости;
- теплообмен между газом и стенками емкостей отсутствует;
- газ в емкостях однороден по составу, не меняет своего агрегатного состояния, имеет постоянную теплоемкость и подчиняется закону Менделеева – Клапейрона (совершенный газ).

Квазистационарный подход удобен для многократных параметрических расчетов, необходимых в ходе предварительных оценочных и конструкторских исследований. В работе [4] приведены результаты подробных параметрических расчетов процесса перетекания газа из одной емкости в другую при различных сочетаниях начальных условий. Однако применимость представленных там предположений при описании реального рабочего процесса установки не очевидна и требует экспериментального подтверждения. Прежде всего, вызывает сомнение предположение о квазистационарности процесса заполнения вакуумной емкости. Действительно, если в качестве характерного времени выравнивания давления по объему принять время прохождения звуковой волны, то при длине вакуумной емкости ~ 10 м получим времена порядка $0,01 \div 0,03$ с, которые вполне соизмеримы с характерным временем рабочего режима ($0,05 \div 0,10$ с) для аэродинамических труб кратковременного действия. В работе [5] подобные оценки без экспериментальной проверки послужили основанием для отказа от попытки использования квазистационарной методики расчета размеров вакуумной емкости.

Задача опорожнения и наполнения сосудов в квазистационарной постановке рассматривалась в целом ряде прикладных работ, начиная с [6]. Так, в монографии [7] были представлены дифференциальные уравнения, описывающие процесс перетекания в квазистационарном приближении для «сосредоточенных объемов», полученные на основе термодинамического анализа систем с переменной массой рабочего тела. В работах Н.М. Беляева и его сотрудников были получены аналитические решения этих уравнений для целого ряда практически важных ситуаций. Подробное и систематическое изложение результатов этих работ приведено в [8]. Обзор литературы, посвященный перетеканию газа между сообщающимися емкостями, приведен в [9]. Здесь же отмечены встречающиеся ошибки в постановке задачи.

Предположение об адиабатичности процесса заполнения вакуумной емкости считается, как правило, вполне оправданным при малой продолжительности режима втекания. Однако следует отметить, что продолжительность режима обычно является «малой» по сравнению с характерным временем выравнивания температуры по объему вакуумной емкости и здесь теплообмен со стенками действительно не успевает начаться. Кроме того, как будет показано ниже, для увеличения продолжительности рабочего режима имеет смысл рассмотреть заполнение вакуумной емкости с отводом тепла от втекающего газа. Предположение о постоянстве теплофизических свойств рабочего газа существенно упрощает расчетные соотношения, но также требует обоснования, хотя бы в виде оценки вносимой погрешности.

2. Основные соотношения

Рассмотрим систему, состоящую из двух сосудов (источника рабочего газа и вакуумной емкости) с заданными объемами, заполненных газом одинакового состава,

но с разными начальными параметрами (см. рис. 1). Соединяющий эти сосуды трубопровод переменного сечения (например, в виде сопла Лавалю) мгновенно открывается в некоторый момент времени $t(0) = 0$, принятый за начало процесса. Требуется рассчитать изменение параметров газа (давление и температуру по времени) в каждом из сосудов.

Следуя рекомендациям [7, 8], в качестве исходного уравнения используем первый закон термодинамики:

$$dQ = dU + dL, \quad (1)$$

где Q — энтальпия газа в сосуде, U — внутренняя энергия газа в сосуде, L — работа, совершаемая над газом в сосуде. Для источника, из которого вытекает рабочий газ, слагаемое $dL = 0$, так как стенки остаются неподвижными и $dV = 0$. Тогда изменение внутренней энергии остающегося в источнике газа можно записать как

$$dU_C = dQ_C = -G_C \cdot i_C \cdot dt, \quad (2)$$

где i_C — удельная энтальпия 1 кг газа по параметрам торможения в источнике, G_C — расход газа из источника.

Специфическим условием рассматриваемой задачи является то, что струя, вытекающая из источника, одновременно является струей, втекающей в вакуумную емкость. Поэтому изменение внутренней энергии газа в вакуумной емкости равно подводу тепла вместе с притекающим газом:

$$dU_V = dQ_C = G_C \cdot i_C \cdot dt. \quad (3)$$

Используя известные термодинамические соотношения и уравнение состояния идеального газа, получим набор формул для основных параметров газа в каждом из сосудов, соответствующих следующим расчетным ситуациям:

— втекание в вакуумную емкость происходит без теплообмена со стенками (адиабатическое втекание);

— втекание в вакуумную емкость происходит с сохранением постоянной температуры газа в вакуумной емкости (изотермическое втекание);

— втекающий газ имеет постоянные параметры по времени (т.е. источник имеет бесконечный объем);

— исходное давление в вакуумной емкости $P_V(0) = 0$ или $P_V(0) \neq 0$.

Основные уравнения для изменяющихся параметров газа для случая адиабатического истечения из источника с ограниченным объемом получены в работе [8]:

$$P_C(t) = P_C(0)(1 + B \cdot t)^{2\chi/(1-\chi)}. \quad (4)$$

Здесь P_C — давление торможения в источнике рабочего газа, B — коэффициент, записываемый в виде $B = \frac{\chi-1}{2V_C} \cdot R \cdot m \cdot F^* \sqrt{T_C(0)}$, m — газодинамический коэффициент, рас-

считываемый как $m = \sqrt{\chi(2/\chi+1)^{(\chi+1)/(\chi-1)}} \cdot \sqrt{1/R}$, χ — показатель адиабаты, R — газовая постоянная, μ — коэффициент расхода, $q(M)$ — газодинамическая функция, F^* — площадь критического сечения.

Другое уравнение из работы [8] имеет вид:

$$T_C(t) = T_C(0) \cdot (1 + Bt)^{-2}, \quad (5)$$

здесь T_C — температура торможения газа в источнике.

И, наконец, уравнение для расхода газа из источника записывается как

$$G_C(t) = G_C(0)(1 + B \cdot t)^{2\chi/(1-\chi)}, \quad (6)$$

где $P_C(0) = \frac{mP_C(0) \cdot F^* \cdot \mu}{\sqrt{T_C(0)}} \cdot q(M)$.

Предполагается, что коэффициент расхода $\mu = 1,0$ и перетекание всегда происходит при сверхкритическом перепаде давлений в сосудах, поэтому $q(M = 1) = 1,0$.

Суммарная масса газа, вытекающего из источника за время от $t(0) = 0$ до t , составляет

$$m_C(t) = \int_0^t G_C(0) \cdot (1 + B \cdot \tau)^{(\chi+1)/(1-\chi)} \cdot d\tau = G_C(0) \cdot \frac{(1 + B \cdot t)^{2/(1-\chi)} - 1}{2B/(1-\chi)}.$$

Учитывая характеристики потока газа из источника, получим изменение давления и температуры газа в вакуумной емкости:

$$P_V(t) = \frac{V_C}{V_V} \cdot P_C(0) \cdot \left[1 - (1 + B \cdot t)^{2\chi/(1-\chi)} \right] + P_V(0), \quad (7)$$

$$T_V(t) = \frac{T_C(0) \cdot \left[1 - (1 + B \cdot t)^{2\chi/(1-\chi)} \right] + (m_V(0)/m_C(0)) \cdot T_V(0)}{\left[1 - (1 + B \cdot t)^{2/(1-\chi)} \right] + m_V(0)/m_C(0)}, \quad (8)$$

$$T_V(t) = \frac{P_C(0) \cdot V_C \cdot \left[1 - (1 + B \cdot t)^{2\chi/(1-\chi)} \right] + P_V(0) \cdot V_V}{(P_C(0) \cdot V_C / T_C(0)) \cdot \left[1 - (1 + B \cdot t)^{2/(1-\chi)} \right] + P_V(0) \cdot V_V / T_V(0)}, \quad (9)$$

$$P_V(t) = \frac{V_C}{V_V} \cdot P_C(0) \cdot \left[1 - (1 + B \cdot t)^{2\chi/(1-\chi)} \right], \quad (10)$$

$$T_V(t) = T_C(0) \cdot \left[(1 + B \cdot t)^{2\chi/(1-\chi)} - 1 \right] / \left[1 - (1 + B \cdot t)^{2/(1-\chi)} \right]. \quad (11)$$

При изотермическом заполнении вакуумной емкости используются уравнения:

$$P_V(t) = \frac{V_C}{V_C} \cdot P_C(0) \cdot \frac{T_F}{T_C(0)} \cdot \left[1 - (1 + B \cdot t)^{2/(1-\chi)} \right] + P_V(0), \quad (12)$$

$$T_V(t) = T_V(0) = T_F; \quad (13)$$

$$P_V(t) = \frac{V_C \cdot P_C(0) \cdot T_F}{V_V \cdot T_C(0)} \cdot \left[1 - (1 + B \cdot t)^{2/(1-\chi)} \right], \quad (14)$$

$$T_V(t) = T_V(0) = T_F; \quad (15)$$

$$P_V(t) = \frac{\chi \cdot R \cdot G_0 \cdot T_0 \cdot t}{V_V} + P_V(0), \quad (16)$$

$$T_V(t) = \frac{P_V(t) \cdot V_V}{R \cdot m_V(t)} = \frac{P_V(t) \cdot V_V}{R} \cdot \frac{1}{G_0 \cdot t + m_V(0)}; \tag{17}$$

$$P_V(t) = \frac{\chi \cdot R \cdot G_0 \cdot T_0 \cdot t}{V_V}, \tag{18}$$

$$T_V(t) = \chi \cdot T_0; \tag{19}$$

$$P_V(t) = \frac{T_F \cdot R}{V_V} \cdot (G_0 \cdot t + m_V(0)), \tag{20}$$

$$T_V(t) = T_V(0) = T_F; \tag{21}$$

$$P_V(t) = \frac{T_F \cdot R}{V_V} \cdot G_0 \cdot t, \tag{22}$$

$$T_V(t) = T_V(0) = T_F. \tag{23}$$

Спецификация перечисленных выше расчетных формул приведена в таблице.

3. Продолжительность рабочего режима аэродинамической установки с вакуумной емкостью

Основной задачей анализа в настоящей работе является определение продолжительности рабочего режима аэродинамической установки с вакуумной емкостью. С газодинамической точки зрения рабочий режим аэродинамической установки ограничен по времени явлением разрушения расчетного течения, которое имеет место при определенном соотношении давления в потоке на выходе соединительного трубопровода и давления в пространстве вакуумной емкости.

Если выхлоп рабочей струи происходит непосредственно в вакуумную емкость (см., например, рис. 1), то продолжительность режима аэродинамической трубы определяется не абсолютным давлением в вакуумной емкости, а отношением давления P_V

Таблица

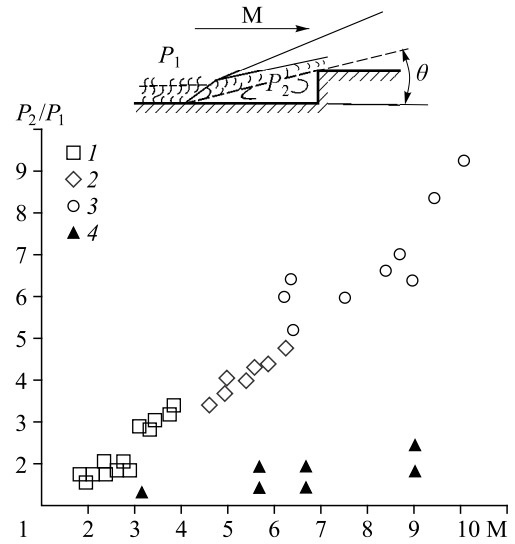
Спецификация формул для расчета параметров газа в сообщающихся сосудах

Параметры газа в форкамере				
Адиабатическое истечение	Давление $P_C(t)$ (4)		Температура $T_V(t)$ (5)	Расход $G_C(t)$ (6)
Расход на входе в вакуумную емкость $G_V(t) = G_C(t) = \text{var}$				
Вид наполнения	$P_V(0) \neq 0$		$P_V(0) = 0$	
Адиабатическое наполнение	Давление $P_V(t)$ (7)	Температура $T_V(t)$ (8, 9)	Давление $P_V(t)$ (10)	Температура $T_V(t)$ (11)
Изотермическое наполнение	Давление $P_V(t)$ (12)	Температура $T_V(t)$ (13)	Давление $P_V(t)$ (14)	Температура $T_V(t)$ (15)
Расход на входе в вакуумную емкость $G_V(0) = G_C(0) = \text{const}$				
Вид наполнения	$P_V(0) \neq 0$		$P_V(0) = 0$	
Адиабатическое наполнение	Давление $P_V(t)$ (16)	Температура $T_V(t)$ (17)	Давление $P_V(t)$ (18)	Температура $T_V(t)$ (19)
Изотермическое наполнение	Давление $P_V(t)$ (20)	Температура $T_V(t)$ (21)	Давление $P_V(t)$ (22)	Температура $T_V(t)$ (23)

Рис. 2. Допустимое повышение давления для безотрывного течения в пограничном слое.

Экспериментальные данные, приведенные в литературных источниках:
1 – 3 — турбулентный пограничный слой,
(3 — испытания в импульсной трубе ИТПИМ),
4 — ламинарный пограничный слой.

к статическому давлению P на срезе соединительного трубопровода: $A = P_V/P$. Конкретное значение допустимого отношения этих давлений в определенной степени условно, но чаще всего на практике оно соответствует моменту перехода от недорасширенного к перерасширенному режиму истечения на выходе соединительного трубопровода и появлению здесь скачков уплотнения от кромки трубопровода. Очевидное минимальное значение составляет $A = 1,0$, когда давление в вакуумной емкости равняется статическому давлению на выходе из соединительного трубопровода ($P_V = P$).



Допустимая величина повышения давления в скачках на выходе соединительного трубопровода, которое не приводит к отрыву пограничного слоя на срезе трубопровода и разрушению расчетного течения, зависит от состояния пограничного слоя и может составлять $A = 1,5 - 2,5$ для ламинарного пограничного слоя и $A = 4 - 9,3$ — для турбулентного (см. рис. 2) [10].

При известной величине A продолжительность рабочего режима аэродинамической установки с вакуумной емкостью можно найти из условия

$$P_V(t) \leq \pi(M) \cdot A \cdot P_C(t), \quad (24)$$

здесь $\pi(M)$ — газодинамическая функция.

Продолжительность рабочего режима в случае адиабатического заполнения вакуумной емкости рассчитывается как

$$t = \frac{1}{B} \cdot \left[\frac{(V_C/V_V \cdot P_C(0) + P_V(0))}{\pi(M) \cdot A \cdot P_C(0) \cdot (1 + V_C/V_V)} \right]^{(1-\chi)/2\chi} - 1, \quad (25)$$

при $P_V(0) = 0$ —

$$t = \frac{1}{B} \cdot \left[\frac{V_C}{\pi(M) \cdot A \cdot (V_C + V_V)} \right]^{(1-\chi)/2\chi} - 1. \quad (26)$$

Продолжительность рабочего режима в случае изотермического заполнения вакуумной емкости можно найти из решения следующего полинома:

$$(1 + B \cdot t)^{2/(1-\chi)} \cdot \left(\pi(M) \cdot A \cdot P_C(0) \cdot (1 + B \cdot t)^\chi + \frac{V_C \cdot P_C(0) \cdot T_F}{V_V \cdot T_C(0)} \right) = \frac{V_C \cdot P_C(0) \cdot T_F}{V_V \cdot T_C(0)} + P_V(0); \quad (27)$$

при $P_V(0) = 0$ —

$$(1 + B \cdot t)^{2/(1-\chi)} \cdot \left(\pi(M) \cdot A \cdot P_C(0) \cdot (1 + B \cdot t)^\chi + \frac{V_C \cdot P_C(0) \cdot T_F}{V_V \cdot T_C(0)} \right) = \frac{V_C \cdot P_C(0) \cdot T_F}{V_V \cdot T_C(0)}. \quad (28)$$

Выписать зависимость в явном виде для продолжительности режима t в случае изотермического заполнения не удастся, поэтому уравнения (27) или (28) при заданной величине $A = P_V/P$ решаются относительно t методом последовательных приближений.

Если расход и давление втекающего газа постоянные, то при заданной величине A получаем продолжительность рабочего режима в случае адиабатического заполнения в виде

$$t = \frac{V_V \cdot [(P_C(0) \cdot \pi(M) \cdot A - P_V(0))]}{\chi \cdot R \cdot G_0 \cdot T_0}, \quad (29)$$

при $P_V(0) = 0$ —

$$t = \frac{V_V \cdot (P_C(0) \cdot \pi(M) \cdot A)}{\chi \cdot R \cdot G_0 \cdot T_0}. \quad (30)$$

Аналогично, если расход и давление втекающего газа постоянные, то при заданной величине A продолжительность рабочего режима в случае изотермического заполнения с постоянной температурой газа в вакуумной емкости T_F запишется как

$$t = \frac{V_V \cdot P_C(0) \cdot \pi(M) \cdot A}{T_F \cdot R \cdot G_0} - \frac{m_V(0)}{G_0}, \quad (31)$$

а при $P_V(0) = 0$ —

$$t = \frac{V_V \cdot P_C(0) \cdot \pi(M) \cdot A}{T_F \cdot R \cdot G_0}. \quad (32)$$

4. Выбор рационального соотношения объемов источника рабочего газа и вакуумной емкости

Задавая допустимую степень падения давления рабочего газа за время режима $P_C(t)/P_C(0)$ и условие $P_V(0) = 0$, из формулы (10) получим отношение требуемого объема вакуумной емкости к объему источника рабочего газа при адиабатическом заполнении:

$$\frac{V_V}{V_C} = \frac{1}{\pi(M) \cdot A} \cdot \left[\left(\frac{P_C(t)}{P_C(0)} \right)^{-1} - 1 \right]. \quad (33)$$

Задавая допустимую степень падения давления рабочего газа за время режима $P_C(t)/P_C(0)$ и условие $P_V(0) = 0$, из формулы (14) получим отношение требуемого объема вакуумной емкости к объему источника рабочего газа при изотермическом заполнении:

$$\frac{V_V}{V_C} = \frac{1}{\pi(M) \cdot A} \cdot \frac{T_F}{T_C(0)} \cdot \left[\left(\frac{P_C(t)}{P_C(0)} \right)^{-1} - \left(\frac{P_C(t)}{P_C(0)} \right)^{(1-\chi)/\chi} \right]. \quad (34)$$

На рис. 3а показано требуемое отношение объемов при адиабатическом заполнении в зависимости от числа Маха в выходном сечении соединительного трубопровода при допустимом отношении давлений $A = P_V/P = f(M)$, соответствующем предельному отношению давлений, которое выдерживает турбулентный пограничный слой на выходе соединительного трубопровода в случае перерасширенной струи (см. рис. 2).

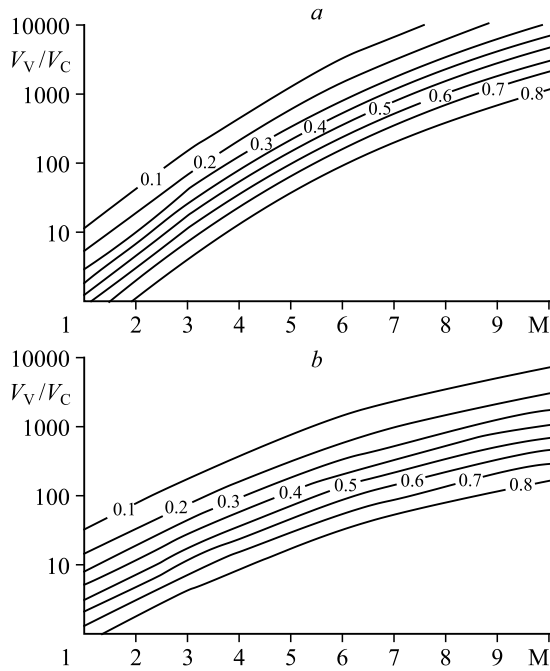


Рис. 3. Соотношение объемов вакуумной емкости и емкости рабочего газа с выхлопом непосредственно в вакуумную емкость.

Цифрами обозначены отношения $P_c(t)/P_c(0)$;

a — адиабатическое заполнение, b — изотермическое заполнение.

Прежде всего, виден значительный рост требуемого отношения объемов V_v/V_c по мере роста числа Маха потока. Уже при $M = 6$ объем вакуумной емкости при степени падения давления $P_c(t)/P_c(0) = 0,1$ должен в 3600 раз превышать объем емкости рабочего газа. При $M = 10$ объем вакуумной емкости должен в 50000 раз превышать объем емкости рабочего газа. Увеличение допустимой степени падения давления рабочего газа за время рабочего режима от $\frac{P_c(t)}{P_c(0)} = 0,1$ до $\frac{P_c(t)}{P_c(0)} = 0,8$ приводит к значительному уменьшению

требуемого объема вакуумной емкости ($\sim$ в 36 раз). Однако следует отметить, что с ростом M при реальных размерах рабочего потока объем емкости рабочего газа может быть уменьшен в сотни раз, поэтому реальный диапазон изменения объема вакуумной емкости получается значительно меньше — всего в десятки раз.

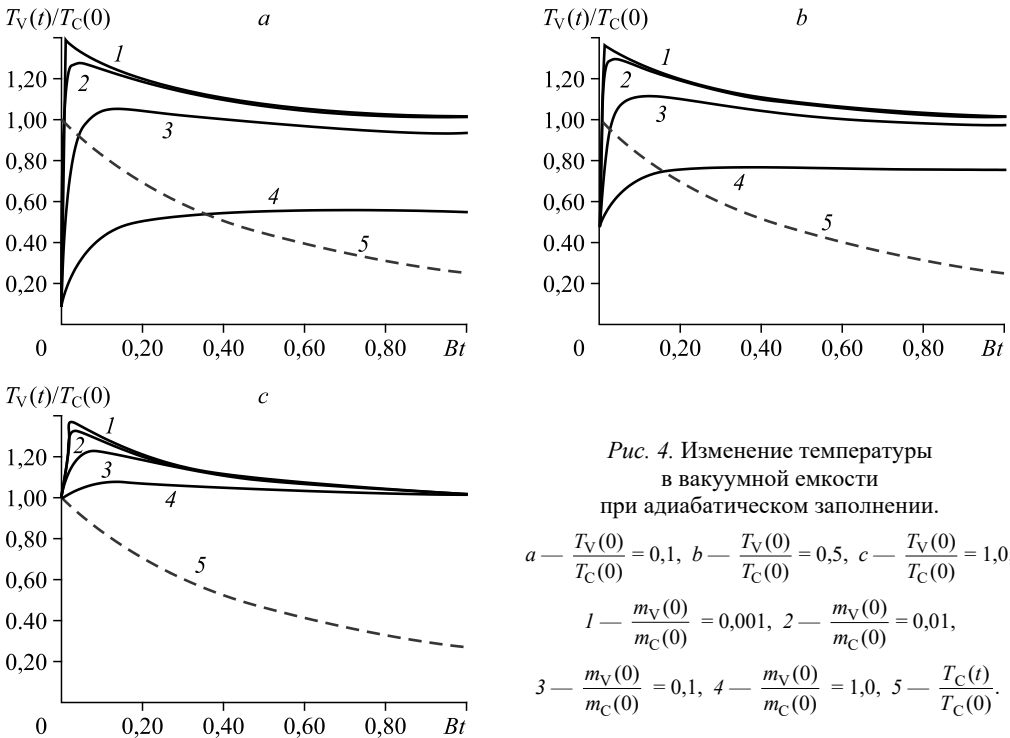
На рис. 3 b показаны соотношения объемов рабочего газа и вакуумной емкости в случае изотермического заполнения. Здесь $T_v = T_F = 290$ К, а $T_c(0)$ выбирается таким образом, чтобы в конце режима при достижении заданного отношения $P_c(t)/P_c(0)$ статическая температура потока T равнялась температуре конденсации воздуха (≈ 70 К). Отношение давлений $A = P_v/P = f(M)$ соответствует предельному отношению давлений, которое выдерживает турбулентный пограничный слой в случае перерасширенной струи (см. рис. 2). Видно, что изотермическое заполнение позволяет уменьшить требуемый объем вакуумной емкости на порядок по сравнению с адиабатическим заполнением. Приведенные графики дают возможность оценить требуемый объем вакуумной емкости при проекторочных расчетах.

5. Понижение температуры газа в вакуумной емкости

Используя формулу (9), рассмотрим поведение температуры газа в вакуумной емкости при адиабатическом заполнении:

$$\frac{T_V(t)}{T_C(0)} = \frac{\left[1 - (1 + B \cdot t)^{2\chi/(1-\chi)}\right] + \frac{m_V(0)}{m_C(0)} \cdot \frac{T_V(0)}{T_C(0)}}{\left[1 - (1 + B \cdot t)^{2/(1-\chi)}\right] + \frac{m_V(0)}{m_C(0)}}. \quad (35)$$

На рис. 4 показано изменение температуры газа в вакуумной емкости $\frac{T_V(t)}{T_C(0)}$, вычисленное по формуле (35) при различных значениях $\frac{m_V(0)}{m_C(0)}$ и $\frac{T_V(0)}{T_C(0)}$, в зависимости от безразмерного времени Bt . Видно, что при отсутствии начальной массы газа в вакуумной емкости отношение в начале процесса $\frac{T_V(t)}{T_C(0)} \rightarrow \chi$, а затем температура $T_V(t)$ плавно уменьшается до значения $T_V(t) = T_C(0)$. Таким образом, температура газа в вакуумной емкости может быть выше, чем начальная температура газа в форкамере (в пределе, при бесконечном объеме источника рабочего газа, в χ раз [9]). Отметим, что после выравнивания давлений в источнике рабочего газа и вакуумной емкости газ в этих сосудах будет иметь существенно разную температуру (например, при $\frac{m_V(0)}{m_C(0)} = 0$



и $Bt = 1,0$ имеем $\frac{T_V(t)}{T_C(0)} = 4,1$). Разность температур в дальнейшем будет выравниваться

за счет медленного конвективного теплообмена, и в конце концов во всей системе установится постоянная температура.

Очевидно, что, снижая температуру газа в вакуумной емкости, можно пропорционально снизить давление в ней и тем самым увеличить продолжительность режима работы аэродинамической установки, не увеличивая объем вакуумной емкости. Так, сравнивая выражения (7) и (12) для изменения давления в вакуумной емкости в случае адиабатического и изотермического процессов заполнения, можно видеть, что в (12) при V_V

появляется множитель $\frac{T_C(0)}{T_F} \geq 1$, который при достаточно большой разнице температур

создает эффект существенного пропорционального увеличения объема вакуумной емкости (в десятки раз).

Это обстоятельство еще раз наглядно указывает на необходимость использования изотермического заполнения при большой разнице температур втекающего газа и газа в вакуумной емкости. С практической точки зрения представляется вполне реальным установить в вакуумную емкость холодильное устройство, например, в виде предварительно охлажденных медных или алюминиевых пластин, отбирающих тепло от втекающего газа за счет собственной теплоемкости. При этом температура пластин практически не увеличивается из-за небольшой массы рабочего газа и кратковременности процесса. Применение пластинчатого холодильного устройства было опробовано при испытаниях модели воздухозаборника с измерением расхода в аэродинамической трубе ИТ-301 [11].

6. Выбор допустимого начального давления в вакуумной емкости

Из формул (29) и (30) видно, что максимальная продолжительность режима достигается при $P_V(0) = 0$. По мере увеличения начального давления $P_V(0)$ продолжительность режима уменьшается, и при $P_V(0) \geq P_C(0)A\pi(M)$ рабочий режим вообще не может быть реализован. Однако получение глубокого вакуума ($P_V(0) \approx 0$) является трудно выполнимой задачей для вакуумных емкостей с объемом в десятки и сотни кубических метров. Поэтому попытаемся определить, каким может быть допустимое начальное давление $P_V(0)$, чтобы реальная продолжительность рабочего режима мало отличалась от максимально возможной. Условие задачи сформулируем следующим образом:

$$\frac{t_{\text{ideal}} - t_{\text{real}}}{t_{\text{ideal}}} \leq \varepsilon, \quad (36)$$

здесь t_{ideal} — максимальная продолжительность рабочего режима при $P_V(0) = 0$, t_{real} — реальная продолжительность режима при $P_V(0) \neq 0$, ε — задаваемая степень отличия.

Подставляя в (36) выражения (25) и (26) при адиабатическом заполнении вакуумной емкости, получаем:

$$\frac{t_{\text{ideal}} - t_{\text{real}}}{t_{\text{ideal}}} = \varepsilon = 1 - \frac{\left[1 + \frac{V_V}{V_C} \cdot \frac{P_V(0)}{P_C(0)}\right]^{(1-\chi)/2\chi} - \left[\pi(M) \cdot A \cdot \left(1 + \frac{V_V}{V_C}\right)\right]^{(1-\chi)/2\chi}}{\left[1 - \pi(M) \cdot A \cdot \left(1 + (V_V/V_C)\right)\right]^{(1-\chi)/2\chi}}. \quad (37)$$

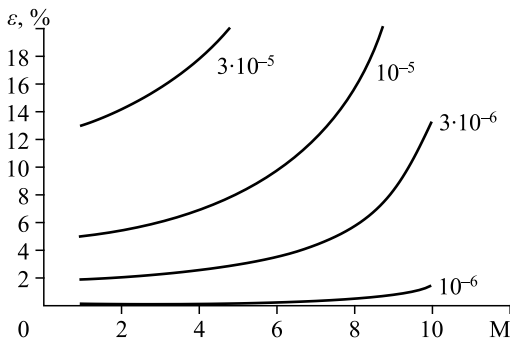


Рис. 5. Уменьшение продолжительности рабочего режима при адиабатическом заполнении $V_V/V_C = 10000$.

Цифрами указано отношение $P_V(0)/P_C(0)$.

Из (37) видно, что допустимое начальное давление зависит от числа М рабочей струи, от начального давления в форкамере и от соотношения объемов емкости рабочего газа и вакуумной емкости. Пример степени уменьшения продолжительности рабочего режима при заданном соотношении объемов вакуумной емкости и источника рабочего газа показан на рис. 5. Видно, что, допуская уменьшение продолжительности рабочего режима на 10 %, можно на порядок снизить требования к минимальному начальному давлению в вакуумной емкости.

Если расход на входе постоянный, то, подставляя в (36) выражения (29) и (30) при адиабатическом заполнении вакуумной емкости, получаем:

$$\frac{t_{\text{ideal}} - t_{\text{real}}}{t_{\text{ideal}}} = \frac{P_V(0)}{P_C(0)} \cdot \frac{1}{\pi(M) \cdot A} \leq \varepsilon. \quad (38)$$

На рис. 6 показано влияние отношения начальных давлений $P_C(0)/P_V(0)$ на степень уменьшения продолжительности рабочего режима $\varepsilon = \frac{t_{\text{ideal}} - t_{\text{real}}}{t_{\text{ideal}}}$ в зависимости от чис-

ла Маха на выходе соединительного трубопровода при постоянном втекающем расходе. В данном случае уменьшение продолжительности рабочего режима на 10 % снижает требования к минимальному начальному давлению в вакуумной емкости на 2–3 порядка.

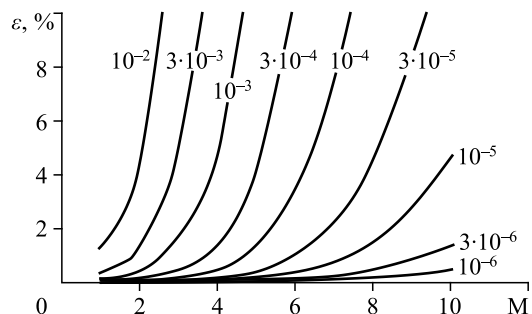
Приведенные элементарные расчеты показывают, что требование очень низкого начального давления в вакуумной емкости не всегда оправдано.

Выводы

Вакуумная емкость представляет собой наиболее громоздкую часть аэродинамической установки кратковременного действия, а обслуживающая ее система вакуумных насосов довольно энергоемка и сложна в эксплуатации. Заполнение вакуумной емкости ограниченного объема приводит к непрерывному повышению давления в ней и, в конце концов, к разрушению рабочего потока в рабочей части установки. Таким образом, газодинамическая картина течения и конструктивные ограничения вакуумной емкости определяют реальную продолжительность рабочего режима. Поэтому правильный подход к выбору параметров вакуумной емкости (таких как ее объем, минимальное давление, скорость откачки) имеет чрезвычайно большое значение при разработке и создании оптимальной конструкции аэродинамической установки.

Рис. 6. Уменьшение продолжительности рабочего режима при постоянном втекающем расходе $V_V/V_C = \infty$.

Цифрами указано отношение $P_V(0)/P_C(0)$.



В представленной работе рассмотрен набор аналитических соотношений, полученных с использованием гипотезы квазистационарности, которые обеспечивают расчет изменяющихся параметров (давления, температуры, расхода) газа в вакуумной емкости при различных вариантах заполнения. Даны рекомендации по выбору оптимального соотношения объемов вакуумной емкости и источника рабочего газа установки. Показано, что при изотермическом заполнении давление в вакуумной емкости может возрасти на порядок медленнее, чем при адиабатическом заполнении.

Предложены соотношения для расчета продолжительности рабочего режима. В качестве определяющего продолжительность критерия принято такое повышение давления в вакуумной емкости $A = P_V/P$, которое вызывает отрыв пограничного слоя и разрушение расчетного режима течения на выходе соединительного трубопровода. Приведены примеры определения величины допустимого повышения давления и, соответственно, продолжительности рабочего режима для различных газодинамических ситуаций.

Показано, что небольшое допустимое уменьшение продолжительности рабочего режима аэродинамической установки может на порядки снизить требования к минимизации начального давления в вакуумной емкости.

Список сокращений и обозначений

M — число Маха,	R — газовая постоянная, Дж/(кг·К),
F^* — площадь критического сечения, m^2 ,	T — температура, К,
t — время, с,	m — газодинамический коэффициент,
V — объем, m^3 ,	χ — показатель адиабаты,
Q — энтальпия газа в сосуде, Дж,	μ — коэффициент расхода,
U — внутренняя энергия газа в сосуде, Дж,	$q(M)$ — газодинамическая функция,
L — работа, совершаемая над газом в сосуде,	$\pi(M)$ — газодинамическая функция,
G_C — расход газа из источника, кг/с,	m_C — масса газа в источнике, кг,
i_C — удельная энтальпия газа по параметрам торможения, Дж/кг,	m_V — масса газа в вакуумной емкости, кг,
P — давление, Па,	A — отношение давлений,
B — коэффициент,	W — скорость газа, м/с,
	T_F — постоянная температура, К.

Индексы

V — параметры в вакуумной емкости,	ideal — идеальные значения,
C — параметры в источнике рабочего газа,	real — реальные значения.
0 — параметры торможения газа,	

Список литературы

1. Поуп А., Гойн К.Л. Аэродинамические трубы больших скоростей. Пер. с англ. М.: Мир, 1968. 504 с.
2. Безменов В.Я. Исследование процесса работы сверхзвуковой баллонно-вакуумной аэродинамической трубы кратковременного действия // Учен. зап. ЦАГИ. 1987. Т. 18, № 4. С. 50–58.
3. Звезгинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. 1. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
4. Соснин Е.И. Изменение параметров газа в процессах наполнения и опорожнения емкостей // Тр. ЦАГИ. 1976. Вып. 1786. С. 3–21.
5. Королев А.С., Бошенятов Б.В., Друкер И.Г., Затолока В.В. Импульсные трубы в аэродинамических исследованиях. Новосибирск: Наука, 1978. 80 с.
6. Шюле В. Техническая термодинамика. Т. 2, М.-Л.: ОНТИ, 1938. 520 с.
7. Мамонтов М.А. Некоторые случаи течения газов. М.: Оборонгиз. 1951. 491 с.
8. Беляев Н.М. Термодинамика переменного количества газа. Днепропетровск: ДГУ, 1981. 110 с.
9. Лыжин О.В., Искра А.Л. Процесс аварийной разгерметизации вакуумной камеры // Тр. ЦАГИ. 1969. Вып. 1046. С. 3–10.

10. Бошенятов Б.В., Затолока В.В., Ярославцев М.И. Исследование отрывного обтекания конусов с турбулентным пограничным слоем при числах Маха 8,3 и 10 // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1975. Вып. 2, № 8. С. 43–49.
11. Гилязетдинов Б.Н., Затолока В.В. Испытания воздухозаборников в импульсной аэродинамической трубе с измерениями их расходных характеристик. Новосибирск. Препринт ИТПМ СО АН СССР № 6-85. 1985. 17 с.

*Статья поступила в редакцию 27 февраля 2023 г.,
после доработки — 1 апреля 2023 г.,
принята к публикации 16 июня 2023 г.*