

УДК 533.17

## **Исследование нестационарного истечения газа из емкости\***

**Гимон Т.А., Звегинцев В.И., Федорова Н.Н.**

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

E-mail: nfed@itam.nsc.ru

Выполнено экспериментальное исследование процесса истечения воздуха из емкости с характерной продолжительностью от 0,6 до 9 с через дросселирующие трубки различной конфигурации. Определена эквивалентная площадь выходного отверстия в зависимости от отношения длины дросселирующей трубки к ее номинальному диаметру. Получено, что в процессе истечения температура газа внутри емкости снижается на 10 – 15 %, что значительно отличается от теоретической оценки, сделанной в предположении адиабатичности процесса (60 %). По результатам измерения давления и температуры газа в емкости предложен способ вычисления теплового потока от стенок емкости к истекающему газу.

**Ключевые слова:** истечение газа, квазистационарность, неадиабатичность, тепловой поток, экспериментальное исследование.

### **Введение**

Процесс истечения газа из емкости ограниченного объема относится к разряду нестационарных газодинамических задач, поскольку после открытия отверстия в емкости происходит непрерывное изменение массы газа и его параметров. Для анализа таких течений используется гипотеза квазистационарности, основанная на предположении, что скорость распространения возмущений по объему газа значительно превосходит скорость изменения параметров в любой точке этого объема [1 – 4]. В работах [5 – 8] были приведены результаты экспериментов и расчетов истечения газа из резервуаров различного объема, а также получены аналитические зависимости для характеристик течения в адиабатическом случае. При неадиабатическом истечении расчет параметров нестационарного истечения усложняется, поскольку передача тепла происходит за счет сравнительно медленных конвективных процессов, что нарушает гипотезу о постоянстве параметров газа в объеме емкости. Кроме этого, необходимо учитывать, что при истечении газа через трубопровод параметры течения в трубопроводе непрерывно изменяются. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование нестационарного

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (гос. регистрация № 121030500154-2).

истечения газа через отверстия и дросселирующие трубки и разработка на основе полученных экспериментальных данных методики определения характеристик теплообмена газа со стенками.

## 1. Экспериментальная часть

Основу экспериментальной установки (рис. 1) составляет стальная цилиндрическая емкость 1 с толщиной боковых стенок 6 мм, торцовых стенок — 15 мм, внутренним объемом 2100 см<sup>3</sup> и площадью внутренних стенок 772 см<sup>2</sup>. Выходной патрубок установки диаметром 20 мм закрыт быстродействующим электромагнитным клапаном 2, на выходе которого установлены дросселирующие трубки 3 внутренним диаметром  $d$  и длиной  $L$ . Перед экспериментом емкость 1 через вентиль 7 заполнялась сжатым воздухом, после чего производилась выдержка для выравнивания температуры. После включения быстродействующего клапана, который за время 0,001 с открывал проходное отверстие диаметром 25 мм, происходило истечение газа в атмосферу через дросселирующую трубку 3.

В процессе эксперимента происходило непрерывное измерение температуры газа внутри емкости при помощи хромель-копелевой термопары 4 с толщиной проволоки 0,2 мм и давления газа внутри емкости с помощью датчика давления 5. Для контроля начального давления использовался манометр 8 класса точности 0,4. Для измерения давления применялся датчик давления РПД-И с диапазоном измеряемого давления до 1,0 МПа, частотные характеристики которого позволяют использовать его для регистрации быстропротекающих процессов. В качестве регистрирующей аппаратуры была задействована система на основе измерительной платы NI PCI-6255 с точностью регистрации до 16 двоичных разрядов. Погрешность измерения температуры составляла  $\pm 2^\circ$  в диапазоне от  $-50$  до  $+50^\circ\text{C}$ . Погрешность измерения давления составляла  $\pm 5$  кПа (класс точности датчиков давления 0,5 %, диапазон измерения 0 – 1 МПа).

В работе была выполнена серия экспериментов с изменением диаметра трубок  $d$  от 2 до 10 мм и их длины  $L$  от 10 до 1240 мм. Записи давления и температуры торможения для режимов истечения с максимальной (опыт 1) и минимальной (опыт 2) продолжи-

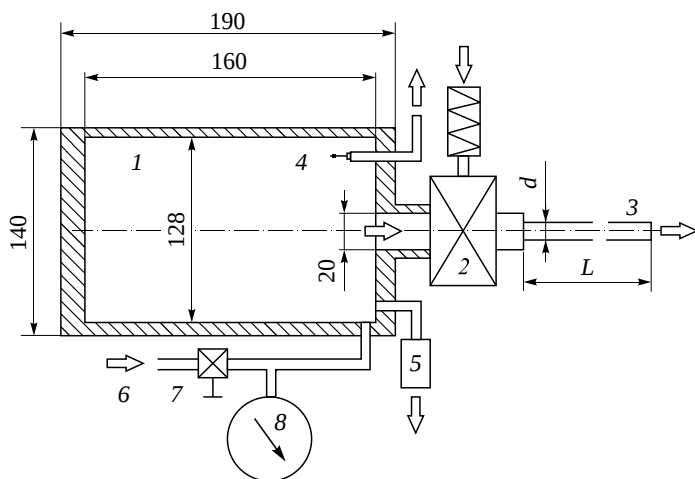


Рис. 1. Схема установки.

- 1 — емкость, 2 — быстродействующий клапан,  
3 — дросселирующая трубка, 4 — термопара, 5 — датчик давления,  
6 — подача воздуха, 7 — вентиль для заполнения,  
8 — контрольный манометр; размеры приведены в мм.

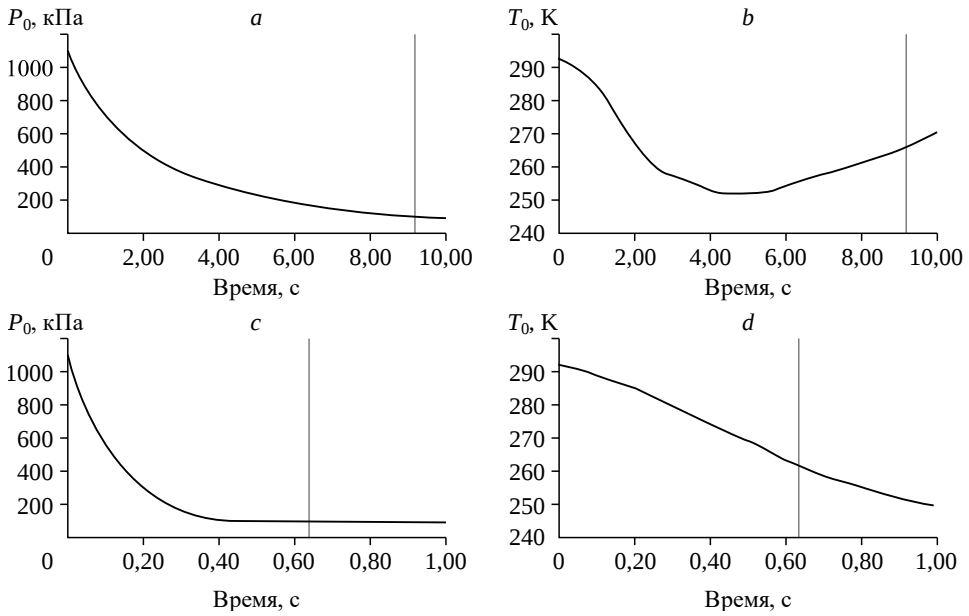


Рис. 2. Изменение температуры и давления воздуха в емкости в процессе истечения при  $L = 10$  мм.

$a, b$  — опыт 1:  $d = 2$  мм;  $c, d$  — опыт 2:  $d = 10$  мм.

тельностью показаны на рис. 2. Вертикальные линии на графиках соответствуют моменту, когда давления внутри и снаружи емкости выравниваются. При уменьшении площади выходного диаметра в 25 раз время истечения увеличивается в 14 раз (с 0,65 до 9 с), что указывает на снижение коэффициента расхода при больших диаметрах выходного отверстия. В процессе истечения происходит уменьшение температуры газа в емкости на  $\sim 40$  °С. При быстром истечении через отверстие большого диаметра (опыт 2) минимум температуры достигается после окончания режима истечения. При медленном истечении (опыт 1) минимум температуры достигается примерно в середине режима (4,0–6,0 с).

## 2. Определение эквивалентного диаметра выходного отверстия

Исследуемый процесс истечения можно считать квазистационарным, поскольку выполняется предложенный в работе [3] критерий:  $V/(a_0 F_{\text{ном}}) = 0,075$  1/с  $>$  0,0101 1/с. Здесь  $V = 0,002$  м<sup>3</sup> — объем емкости,  $a_0 = 340$  м/с — скорость звука газа,  $F_{\text{ном}} = 7,85 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup> — площадь отверстия истечения при максимальном значении диаметра  $d = 0,01$  м. Предполагается, что теплообмен между газом и стенками емкостей отсутствует, а газ в емкости однороден по составу, не меняет агрегатного состояния, имеет постоянную теплоемкость и подчиняется закону Менделеева–Клапейрона. Расход газа через отверстие постоянного сечения можно определить следующим образом [9]:

$$G(t) = m \frac{P_0(t) F^*}{\sqrt{T_0(t)}} q(M) = F^* G_1(t), \quad m = \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} = 0,04033 \sqrt{K}, \quad \text{с/м}, \quad (1)$$

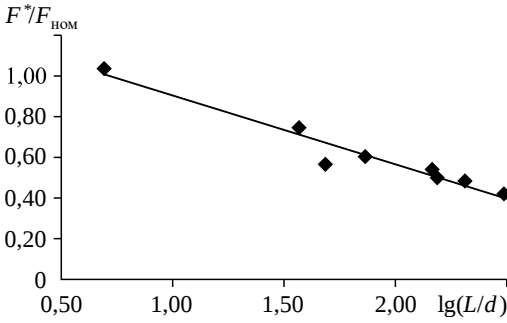


Рис. 3. Величина площади выходного отверстия в зависимости от длины дросселирующей трубки.

где  $P_0(t)$  и  $T_0(t)$  — давление и температура торможения газа в емкости,  $F^*$  — эквивалентная площадь проходного сечения,  $q(M)$  — газодинамическая функция, зависящая от величины числа Маха  $M$  на срезе выходного отверстия:

$$q(M) = M \cdot \left[ \frac{2}{\gamma + 1} \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\gamma + 1}{2(1 - \gamma)}},$$

$$M = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_0(t)}{P_a} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]},$$

где  $P_a$  — давление на выходе. Если отношение давлений

$$\left( \frac{P_0}{P_a} \right)^* = \left[ 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \right]^{\gamma / \gamma - 1}$$

больше критического значения, то принимается  $M = q(M) = 1$ . Расход массы можно определить с помощью уравнения состояния при известных параметрах газа за время истечения как

$$Ma(t) = \frac{V \cdot P_0(t)}{R \cdot T_0(t)}, \quad \Delta Ma = \frac{V}{R} \left[ \frac{P_0(t_1)}{T_0(t_1)} - \frac{P_0(t_2)}{T_0(t_2)} \right] = F^* \cdot \int_{t_1}^{t_2} G_1(t) dt. \quad (2)$$

С помощью (2) определим значение эквивалентной площади  $F^*$  выходного отверстия, которая соответствует массе газа, истекающей из емкости за время от  $t_1$  до  $t_2$ . График относительной площади выходного отверстия (рис. 3) показывает, что эта площадь уменьшается пропорционально логарифму относительной длины  $L/d_{\text{ном}}$  дросселирующей трубки.

### 3. Неадиабатичность процесса истечения газа из емкости

В работах [1, 2] рассматривался случай адиабатического истечения при отсутствии теплообмена между газом и стенками емкости и были получены аналитические формулы, описывающие поведение давления и температуры газа в процессе истечения при заданном объеме емкости  $V$  и известной площади выходного отверстия  $F^*$ :

$$P_0(t) = P_0(0) \cdot (1 + Bt)^{\frac{2\gamma}{1-\gamma}}, \quad T_0(t) = T_0(0) \cdot (1 + Bt)^{-2}, \quad \text{где } B = \frac{\gamma - 1}{2 \cdot V} \cdot R \cdot m \cdot F^* \cdot \sqrt{T_0(0)}, \quad (3)$$

здесь  $P_0(0)$  и  $T_0(0)$  — давление и температура газа в емкости в начальный момент.

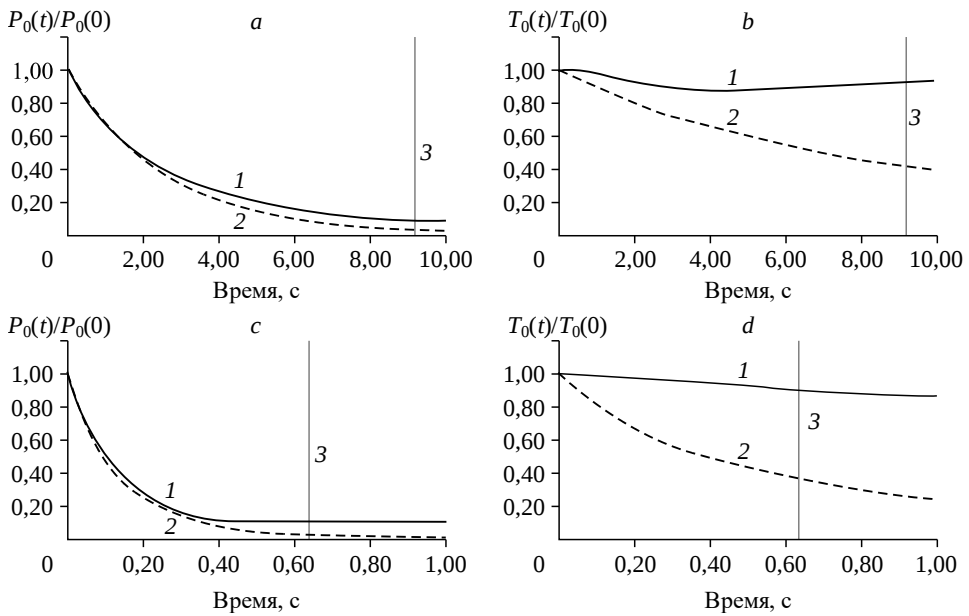


Рис. 4. Относительные полное давление (слева) и температура газа в емкости.

1 — измеренные значения, 2 — адиабатические значения, 3 — окончание режима.

На рис. 4 приведено сравнение параметров газа в емкости, полученных по формулам (3) (штриховая линия) и измеренных в процессе эксперимента (сплошная линия) в опытах с трубкой длиной  $L = 10$  мм, и диаметром  $d = 2$  мм (рис. 4а и 4б) и 10 мм (рис. 4с и 4д).

Обнаружено, что реальные значения давления отличаются от аналитических не более чем на 5–7 % даже в конце режима истечения. Следует подчеркнуть, что формулы (3) справедливы для истечения в вакуум (при выполнении условия  $M = 1$ ), тогда как в экспериментах происходит истечение в атмосферу, и условие  $M = 1$  выполняется до величины  $P_0(t)/P_0(0) > 0.2$ . Поведение экспериментально измеренных значений температуры газа внутри емкости принципиально отличается от значений, рассчитанных для адиабатического процесса. В конце режима температура в адиабатическом процессе уменьшается на 60 % от исходной (т.е. на  $\sim 170^\circ$ ). В реальном эксперименте температура уменьшается всего на 10 % (т.е. на  $\sim 30^\circ$ ), и это наблюдается во всех выполненных экспериментах. Отличия в поведении температуры свидетельствуют о существенном вкладе теплообмена газа со стенками, который должен учитываться при рассмотрении данного процесса. Можно предполагать, что при увеличении времени истечения теплообмен со стенками выравнивает температуру газа и процесс истечения превратится в изотермический. Однако даже при времени истечения 9 с изотермичность процесса не достигается.

#### 4. Тепловой поток от стенок емкости

Тепловой поток к газу от стенок емкости постоянного объема можно получить из уравнения первого закона термодинамики:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{dI}{dt} = \frac{dU}{dt}, \quad (4)$$

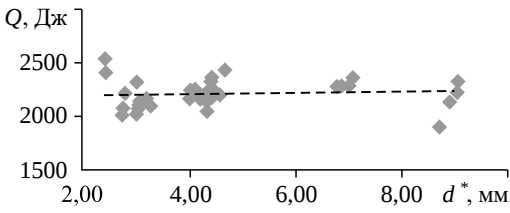


Рис. 5. Суммарное количество тепла, подведенное от стенок емкости к истекающему газу за время процесса истечения.

здесь  $Q$  — количество тепла, подведенного в систему,  $I = c_p \cdot Ma \cdot T$  — энтальпия газа,  $c_p = \gamma \cdot c_v$  — теплоемкость при постоянном давлении,  $c_v$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме,  $U = c_v T$  — внутренняя энергия газа. Дифференцируя выражения для  $U$  и  $I$  с учетом постоянства объема  $V$ , уравнения состояния совершенного газа  $PV = RT$  и формулы (2), получим:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dU}{dt} - \frac{dI}{dt} = \frac{V}{\gamma - 1} \frac{dP}{dt} - c_p \cdot \left( T \cdot \frac{dMa}{dt} + \frac{P \cdot V}{R \cdot T} \cdot \frac{dT}{dt} \right).$$

Изменение массы газа вычисляется по формуле (1) и берется со знаком  $(-)$ , так как происходит уменьшение массы газа в объеме. При  $M = 1$  получим

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{V}{\gamma - 1} \frac{dP}{dt} - c_p \cdot T \cdot m \cdot \frac{P}{\sqrt{T}} \cdot F^* - \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{V \cdot P}{T} \cdot \frac{dT}{dt} = S_1 + S_2 + S_3. \quad (5)$$

Для расчета входящих в (5) слагаемых  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  использовались экспериментальные данные давления  $P_0(t)$  и температуры  $T_0(t)$  газа в емкости на интервале режима истечения  $(t_2 - t_1)$ , аппроксимированные полиномами 4-й степени. В опыте 1 с максимальной продолжительностью истечения значения слагаемых на порядок меньше, чем в опыте 2. При этом вклад третьего слагаемого во втором случае пренебрежимо мал. Значения теплового потока для режима с коротким временем истечения примерно в 10 раз превышают значения теплового потока для продолжительного режима. Однако рис. 5, на котором представлено суммарное количество тепла, подведенное в различных экспериментах (43 опыта) за все время истечения, показывает, что при различных значениях эквивалентного диаметра отверстия (от 2 до 9 мм), соответствующих различной продолжительности процесса истечения (от 0,6 до 9 с), суммарное количество тепла, переданного от стенок к истекающему газу, остается примерно постоянным:  $Q \approx 2210$  Дж (стандартное отклонение  $\pm 6$  %).

## Выводы

Выполнено экспериментальное исследование процесса истечения газа (воздуха) из емкости через дросселирующие трубки различной конфигурации с характерной продолжительностью процесса от 0,6 до 9 с. Предложен способ вычисления эквивалентной площади выходного отверстия по результатам эксперимента в зависимости от соотношения длины дросселирующей трубки к ее номинальному диаметру. Показано, что при увеличении длины трубки  $L/d_{\text{ном}}$  от 1 до 300 относительная площадь выходного отверстия уменьшается на 60 %.

При этом температура газа внутри емкости понизилась на  $30 \div 40^\circ$  (т.е.  $10 \div 15$  %) и значительно отличается от значений для адиабатического случая, составляющего  $170^\circ$  (60 %). Отличие можно объяснить теплоподводом от стенок емкости к истекающему газу, который необходимо учитывать при анализе процессов истечения газа из емкости.

Предложен способ вычисления теплового потока от стенок емкости к истекающему газу по результатам измерения давления и температуры газа в емкости. При изменении характерного времени истечения от 0,6 до 9 с максимальная величина теплового потока от стенок емкости уменьшается с  $\sim 10000$  Дж/с до  $\sim 1000$  Дж/с. В то же время суммарное количество тепла от стенок к газу для всей серии экспериментов, включающей 43 опыта, остается примерно постоянным и составляет  $Q \approx 2210$  Дж (стандартное отклонение  $\pm 6\%$ ).

### Список литературы

1. Мамонтов М.А. Некоторые случаи течения газов. М.: Оборонгиз, 1951. 490 с.
2. Соснин Е.И. Изменение параметров газа в процессах наполнения и опорожнения емкостей // Тр. ЦАГИ. 1976. Вып. 1786. С. 3–21.
3. Звезгинцев В.И., Шашкин А.П. О квазистационарности потока в импульсных аэродинамических трубах // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1988. № 18, вып. 5. С. 54–59.
4. Звезгинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. 1. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
5. Тарасов В.В. Расчет времени истечения идеального газа из резервуара постоянного объема в среду с постоянным давлением при адиабатическом процессе // Вест. ТГУ. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2, № 2. С. 84–95.
6. Курбатов Е.С. Газодинамика процесса истечения из резервуаров со сжатыми газами // Молодой ученый. 2014. № 8. С. 49–51.
7. Dutton J.C., Coverdill R.E. Experiments to study the gaseous discharge and filling of vessels // Intern. J. Engng Ed. 1997. Vol. 13, No. 2. P. 123–134.
8. Кабанов С.М., Фридлендер Г.В. Моделирование процессов истечения сжатого газа из емкости конечного объема // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 5. С. 80–90.
9. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Ч.1. М: Наука, 1991. 597 с.

*Статья поступила в редакцию 27 февраля 2023 г.,  
после доработки — 31 марта 2023 г.,  
принята к публикации 16 июня 2023 г.,  
после дополнительной доработки — 2 августа 2023 г.*