

В. С. ИВЛЕНТИЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫРАВНИВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В СООБЩАЮЩИХСЯ ОБЪЕМАХ И ИСТЕЧЕНИЯ В АТМОСФЕРУ

В инженерной практике нередко приходится решать задачи, связанные с установлением закономерностей изменения давлений газа в системах сообщающихся герметических объемов при изменении давления в одном из них или при разгерметизации одного из них. Обычно приходится решать задачи по определению времени выравнивания давлений газа в сообщающихся объемах, а также по определению времени истечения газа в окружающую среду при сообщении системы с атмосферой (при разгерметизации). Или наоборот — решать задачу о подборе площадей отверстий, соединяющих объемы между собой и атмосферой, обеспечивающих заданное время выравнивания или истечения.

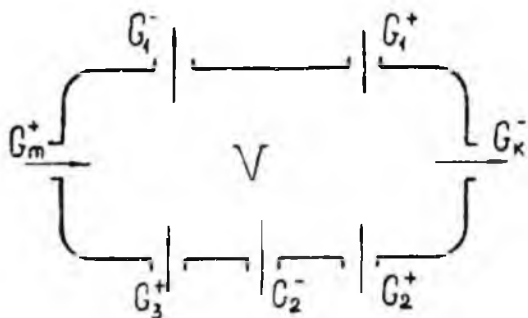
В большинстве исследований, посвященных истечению газа из замкнутого объема и втеканью его в объем, эти два процесса рассматриваются независимо, т. е. рассматривается или истечение из объема в неограниченную среду, параметры газа которой в ходе процесса остаются неизменными, или втеканье газа в объем из неограниченной среды, параметры газа в которой также постоянны [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10] и др. Истечение же в среду с переменными параметрами исследовано недостаточно.

В сложных системах, состоящих из ряда сообщающихся резервуаров, при наличии притока и оттока газа будут иметь место одновременно свершающиеся процессы втеканья газа в систему, истечения из нее в окружающую среду, а также процессы перетекания газа из одного резервуара в другой.

Таким образом, решение задачи об установлении закономерностей изменения давлений газа во времени в том или ином резервуаре системы сводится в общем случае к установлению связи между суммарными секундными расходами втекающего в систему

и вытекающего из нее газа и параметрами газа системы и среды, в которую происходит истечение.

Теория истечения газов устанавливает связь между секундным расходом и параметрами газа сосуда и среды, в которую происходит истечение. Пусть в некоторый объем V (фиг. 1) по различным каналам втекает газ с секундными расходами G_i^+ и вытекает из него с расходами G_i^- .



Фиг. 1. Объем с одновременным наполнением и выходом газа.

Вес газа в выделенном объеме будет:

$$G^* = V \cdot \gamma.$$

В ходе процесса изменение состояния газа в объеме в общем случае подчиняется политропическому закону. Следовательно, данное выражение, учитывая уравнение состояния и уравнение политропы

$$\frac{p}{\gamma} = RT; \quad \frac{p}{\gamma^n} = \frac{p_0}{\gamma_0^n},$$

можно представить в виде:

$$G = \frac{p_0^{\frac{n-1}{n}} \cdot V}{RT_0} p^{\frac{1}{n}}.$$

Изменение количества газа в рассматриваемом объеме за элементарный промежуток времени:

$$dG = \frac{p_0^{\frac{n-1}{n}} \cdot V}{nRT_0} p^{\frac{1-n}{n}} dp. \quad (1)$$

С другой стороны, это изменение может быть представлено как разность между суммарными секундными расходами вытекающего $\sum_1^k G_i^-$ из объема и втекающего в него $\sum_1^m G_i^+$ газа:

$$dG = - \left(\sum_1^k G_i^- - \sum_1^m G_i^+ \right) dt. \quad (2)$$

Приравняв правые части уравнений (1) и (2), получим исходное уравнение (3), устанавливающее связь между секундными расходами, параметрами газа объема и среды со временем:

$$d\tau = -\alpha \frac{dp}{\left(\sum_1^k G_i^- - \sum_1^m G_i^+\right) \rho^{\frac{n-1}{n}}}, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{V \cdot P_0^{\frac{n-1}{n}}}{nRT_0}.$$

Секундный расход G_i может быть постоянным или переменным. В последнем случае:

$$G_i = A_i \tau_i(p).$$

Рассматриваемые процессы втекания и истечения могут совершаться как в закритической, так и в докритической области.

Секундный расход в закритической области определяется известным в газовой динамике уравнением:

$$G_{\text{закр}} = A_{\text{закр}} \cdot p, \quad \text{где } A_{\text{закр}} = \frac{F \rho_0^{\frac{1}{n}}}{\sqrt{RT}}. \quad (4)$$

Для определения секундного расхода в докритической области можно воспользоваться приближенной формулой (5), полученной И. В. Тарасовым [8]; [9], которая учитывает сжимаемость газа и пригодна для практического использования. Погрешности при вычислениях по этой формуле не превосходят 2—2,5% по сравнению известной формулой Сен-Венана (при $k = 1,4$):

$$G_{\text{докр}} = A_{\text{докр}} \sqrt{p_1(p_1 - p_0)}, \quad A_{\text{докр}} = 0,95 F \sqrt{\frac{3g}{kRT}}. \quad (5)$$

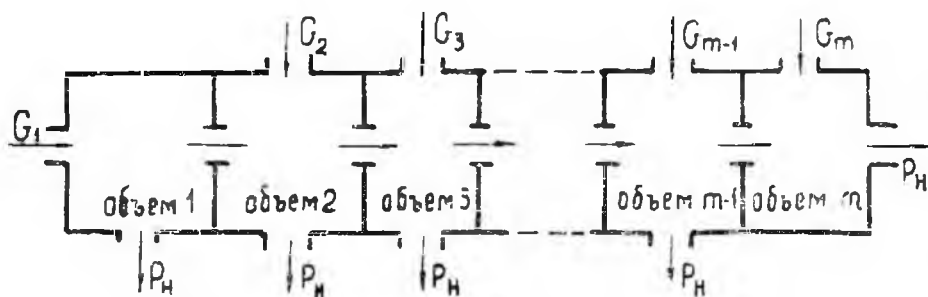
В формулах (4) и (5):

- p_1 и p_0 — соответственно давление в объеме и среде, в которую происходит истечение;
- T — абсолютная температура;
- R — газовая постоянная;
- F — площадь отверстия, через которое происходит истечение;
- α — коэффициент расхода;
- k — показатель адиабаты;
- g — ускорение силы тяжести;

$$\psi_2 = \sqrt[2]{2g \frac{k}{k-1} \left/ \frac{2}{k-1} \right.}^{\frac{2}{k-1}} = 2,15$$

при $k = 1,4$ и $g = 9,8 \text{ м сек}^2$).

Сложную систему сообщающихся газовых емкостей можно представить как ряд сообщающихся между собой герметических объемов, в каждый из которых подается газ и каждый из которых через канал регулирующего давление устройства соединен с окружающей средой (фиг. 2).



Фиг. 2. Система сообщающихся газовых емкостей.

В этом случае исходное уравнение (3) для первого объема будет иметь вид:

$$d\tau = -\alpha_1 \frac{dp_1}{\left[A_1 \varphi \left(\frac{p_n}{p_1} \right) : A_2 \varphi \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - G_1 \right] p_1^{\frac{n-1}{n}}};$$

аналогично для второго

$$d\tau = -\alpha_2 \frac{dp_2}{\left[A_2 \varphi \left(\frac{p_n}{p_2} \right) : A_3 \varphi \left(\frac{p_3}{p_2} \right) - A_1 \varphi \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - G_2 \right] p_2^{\frac{n-1}{n}}}$$

и так далее...

для объема $m-1$

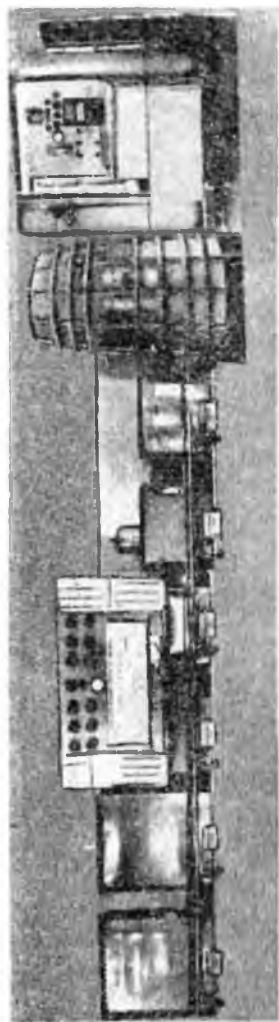
$$d\tau = -\alpha_{m-1} \frac{dp_{m-1}}{\left[A_{m-1} \varphi \left(\frac{p_n}{p_{m-1}} \right) : A_m \varphi \left(\frac{p_m}{p_{m-1}} \right) - A_{m-2} \varphi \left(\frac{p_{m-1}}{p_{m-2}} \right) - G_{m-1} \right] p_{m-1}^{\frac{n-1}{n}}}$$

для объема m

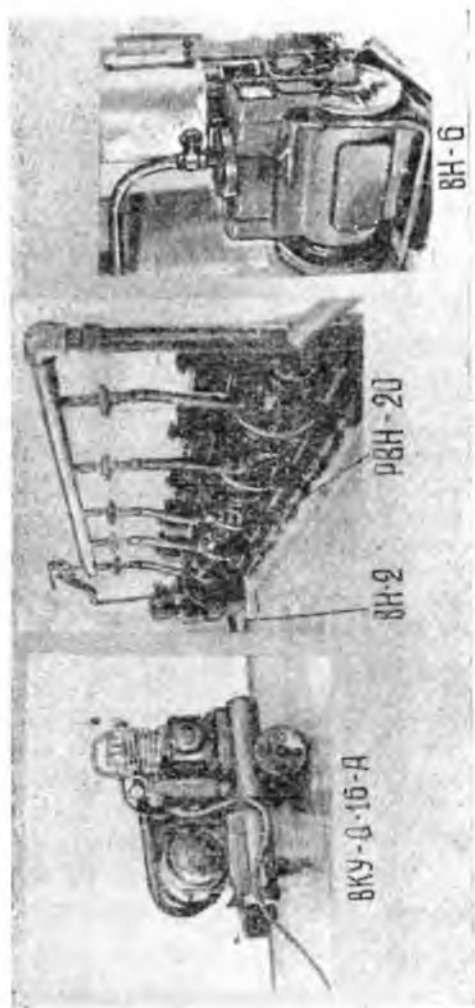
$$d\tau = -\alpha_m \frac{dp_m}{\left[A_m \varphi \left(\frac{p_n}{p_m} \right) - A_{m-1} \varphi \left(\frac{p_m}{p_{m-1}} \right) - G_m \right] p_m^{\frac{n-1}{n}}}$$

Полученная система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка описывает изменение давлений газа в различных объемах системы во времени и является исходным ключом к решению практических задач, связанных с вопросами истечения газа из системы (вследствие некоторой негерметичности ее или вследствие вынужденного сброса давления), выравнивания давлений газа в объемах при некотором изменении его в одном из них (вследствие, например, нарушения нормального функционирования регулирующей аппаратуры) и т. п.

Таким образом, решение поставленной задачи о закономерностях изменения давлений газа в сообщающихся объемах сводится



Фиг. 3. Общий вид экспериментальной установки



Фиг. 4. Вакуумная и компрессорная установки

в самом общем случае к интегрированию системы, состоящей из m (по числу объемов) обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производной.

Полученная система дифференциальных уравнений (6) в общем случае интегрируется численно, например, методом Эйлера или, если требуется большая точность — методом Рунге-Кутты [11]; [12]; [13]. В практических расчетах, осуществляемых с помощью логарифмической линейки, удобнее использовать метод Эйлера, а при расчетах, производимых с помощью электронно-вычислительных машин, лучше использовать более точный метод Рунге-Кутта.

Поскольку реальные системы сообщающихся газовых емкостей имеют вполне определенное, ограниченное число резервуаров, то в конкретных случаях исходная система уравнений может быть значительно упрощена и полностью или частично проинтегрирована в общем виде или сведена к квадратуре.

В частности, для системы, состоящей из двух сообщающихся объемов, решение задачи о выравнивании давления в них и истечении в атмосферу при разгерметизации одного из них приведено в работах [14]; [15]; [16]. Там же [14]; [15] проведено сопоставление теоретических результатов с опытными, показывающее хорошую сходимость их.

Проведенное теоретическое исследование поставленной задачи позволило установить функциональную связь основных параметров, участвующих в рассматриваемых газодинамических процессах, имеющих место в системах сообщающихся газовых емкостей. Результаты опытных исследований, приведенные в работах [14]; [15] дают основание полагать, что установленная связь правильно отражает действительную картину.

Проверка и подтверждение правильности этой связи осуществлялась в лабораторных условиях на экспериментальной установке, принципиальная схема которой и внешний вид представлены на фиг. 3, 4, 5.

Установка включает в себя систему герметических объемов, барокамеру, вакуум-насосную станцию, воздушно-компрессорную установку, систему воздухопроводов, кранов, сменных диафрагм, систему управления и комплекс контрольно-измерительной аппаратуры.

Система герметических объемов состоит из семи резервуаров (от V_1 до V_7) сварной конструкции. Общая емкость всех резервуаров несколько более 6000 л. Одновременно или раздельно объемы с помощью кранов (от Кр 4 до Кр 18) и тяг (тяги 1 и 2), могут быть соединены между собой в различных комбинациях.

Барокамера типовая, полезным объемом 4000 л, с индивидуальным щитом управления и контроля. В барокамере может быть создан необходимый вакуум, соответствующий заданным условиям эксперимента. В случае необходимости (при исследовании процессов перетекания газа из одного объема в другой) барокамера мо-

жет быть включена в общую систему гермообъемов. В этом случае она будет являться еще одним дополнительным резервуаром. Таким образом, общая емкость всей системы может быть доведена до 10000 л., а количество исследуемых объемов при этом может варьироваться в пределах от 2 до 8 в самых разнообразных комбинациях в отношении их количества и емкости.

Вакуум-насосная станция состоит из семи вакуум-насосов ВН с электроприводами. Пять насосов типа ВВН-20, производительностью 200 л/мин каждый, один насос типа ВВН-2 производительностью 430 л/мин, и один ВВН-6 производительностью 150 л/сек. Все вакуум-насосы включены параллельно в общую откачивающую магистраль и с помощью электродистанционного управления ЭДУ могут быть одновременно или по отдельности включены в работу с пульта управления барокамеры.

Воздушно-компрессорная установка, предназначенная для подачи воздуха в гермообъемы при исследовании процессов перегретания и истечения с учетом подачи газа в систему представляет собой типовую компрессорную установку 0-16-А, состоящую из компрессора К, воздушного аккумулятора ВА, масловодоотделителя и электромотора.

Сменные диафрагмы СД позволяют изменять площадь отверстий, соединяющих объемы и представляют собой сменные дюралюминиевые шайбы с различными диаметрами сверлений.

Система воздухопроводов и крапов смонтирована из газовых труб и крапов, кроме Кр 1, Кр 5, Кр 6, Кр 8, Кр 10, Кр 12 и Кр 14, которые изготовлены специально. Проходные сечения крапов и трубопроводов подобраны так, чтобы их гидравлическое сопротивление практически не оказывало влияния на процессы истечения газа через отверстия сменных диафрагм.

Система управления включает в себя управление работой вакуум-насосов и положением различных крапов. Управление вакуум-насосами электродистанционное, осуществляемое с помощью магнитных пускателей, кнопки которых вынесены на пульт барокамеры. Управление кранами ручное. Краны, соединяющие объемы друг с другом, могут быть поставлены в открытое или закрытое положение все одновременно с помощью тяг 1 и 2 или раздельно.

Комплекс контрольно-измерительной аппаратуры включает в себя следующие приборы: ртутный барометр Б и гигрометр Г для измерения абсолютного давления и относительной влажности окружающего воздуха; термометры Т для измерения температуры окружающего воздуха и температуры воздуха в объемах в ходе эксперимента, манометр М и расходомер воздуха РВ для контроля давления и расхода воздуха в нагнетающей магистрали; специальный прибор ВД для контроля давления в барокамере и ватометры ВАР для измерения и контроля скорости изменения давления в объемах и барокамере; указатели УПД перепадов давлений для измерения перепадов давлений между гермообъемами и окружающей средой, между барокамерой и объемами, а также

между барокамерой и окружающей средой и ртутные дифференциальные манометры РМ, дублирующие УПД.

Для пояснения техники проведения экспериментов рассмотрим наиболее сложный случай — истечение газа из многообъемной системы при разгерметизации одного из резервуаров и продолжающейся при этом подаче газа в систему.

Общая картина проведения этого эксперимента выглядит следующим образом: включается в работу откачивающая система при соответствующем положении кранов. Происходит откачка воздуха из барокамеры и системы гермообъемов. При достижении заданного давления в объемах, они отключаются от магистральной откачки закрытием кранов Кр 18 и Кр 19 (при закрытом положении заслонки объема V_7). Теперь откачка происходит только из барокамеры.

При достижении заданного давления в барокамере должен начаться процесс истечения воздуха из системы объемов через заданное отверстие разгерметизации в барокамеру, а также процесс перетекания воздуха из объема в объем при одновременной подаче воздуха в систему. Это может быть осуществлено одновременным включением компрессора и открытием заслонки и кранов, соединяющих объемы друг с другом. Таким образом, является интересующий нас процесс перетекания воздуха в объемах и истечение в среду (барокамеру) через заданное отверстие разгерметизации в сменной диафрагме, расположенной перед заслонкой со стороны барокамеры. В ходе этого процесса необходимо поддерживать постоянной подачу воздуха в систему и давление в барокамере. Из рассмотренного примера видно, что экспериментальная установка довольно универсальна и позволяет осуществить необходимую программу исследований в интересующей области.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Е. Жуковский. Видоизменение метода Кирхгоффа для определения движения жидкости в двух измерениях при постоянной скорости, данной на известной линии тока. Избранные сочинения, т. I. Гостехиздат, 1948.
2. С. А. Чапалыгин. О газовых струях. Госиздат технико-теоретической литературы. М.—Л., 1949.
3. R. V. Mises. Berechnung von Ausfluss und Fallzahlen, V. D. I. Bd. 61, № 22, 23, 24, 1917.
4. В. Шюле. Техническая термодинамика, том II, перевод с немецкого. ОНТИ, 1938.
5. М. И. Жуковский. «Истечение газа из резервуара конечного объема». ЦКТИ, кн. 2, вып. 2. Машгиз, 1947.
6. А. М. Гершкович. Метод расчета времени истечения газа из резервуара постоянного объема. журнал «Кислород», № 1, 1948.
7. Б. И. Якимович. «Теоретическое исследование истечения воздуха из герметических кабин», труды МАИ, вып. IX, 1948.
8. Л. Т. Быков, М. С. Егоров, П. В. Тарасов. «Высотное оборудование самолетов». Оборонгиз, 1958.
9. Л. Т. Быков. Приближенное определение площади проходного сечения крана аварийного сброса давления, труды МАИ, выпуск 143. Оборонгиз, 1961.

10. I. E. Bechwith, I. A. Mootel. An accurate and rapid method for the design of supersonic nozzles. NASA, TN, 1956, № 3322.
11. Б. Н. Демидович, Н. А. Марок. «Основы вычислительной математики», Москва, 1960.
12. Б. Н. Демидович, Н. А. Марок, Э. З. Шувалова. Численные методы анализа, Москва, 1962.
13. К. Лапкош. Практические методы прикладного анализа, перевод с венгерского, Москва, 1961.
14. В. С. Извентьев, Г. В. Филиппов. Исследование истечения газа из сообщающихся сосудов, труды КуАИ, вып. XV, ч. I, 1962.
15. В. С. Извентьев, Г. В. Филиппов. Исследование перетекания газа из сообщающихся сосудов». Известия высших учебных заведений, серия «Авиационная техника», № 2, 1963.
16. В. С. Извентьев, Г. В. Филиппов. Выравнивание давлений в сообщающихся объемах, труды КуАИ, вып. XV, ч. II, 1963.