

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРЦИАЛЬНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ КОМПОНЕНТОВ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОТОКА

*И. С. Боровков, И. Д. Вершинин, Э. П. Павлов, В. М. Санкович*  
(Москва)

Предлагаемый здесь способ разработан для определения парциальных интенсивностей компонентов молекулярного потока, т. е. произведений концентраций молекул компонентов на их средние скорости.

Однако, если известны значения средних скоростей, этот способ может быть использован и для определения состава потока, т. е. парциальных концентраций компонентов.

Для рассмотрения основных вопросов, связанных с определением состава потока газа малой плотности, обратимся к некоторым из выполненных ранее работ.

Устройство для анализа состава потока, используемое в работах [1-3], схематически изображено на фиг. 1.

Часть исследуемого потока забирается через диафрагму 1 устройства в камеру 2, которая непрерывно откачивается диффузионным вакуумным насосом 3. Анализатор 4, представляющий собой масспектрометр, подсоединяется к камере 2.

Состав смеси в анализаторах устройств описанного выше типа отличается от состава смеси в исследуемом потоке. Это отличие обуславливается прежде всего различной проводимостью любого тракта для различных компонентов, а также наличием зависимости быстроты откачки диффузионного насоса от рода откачиваемого газа.

Влияние первого фактора может быть учтено при обработке экспериментальных данных, наличие же селективности откачной способности насоса, подсоединенного к камере анализатора, никакому учету не поддается.

Действительно, обычно предполагается, что быстрота действия диффузионного насоса обратно пропорциональна квадратному корню из молекулярного веса откачиваемого газа. На самом же деле, как показано в работах [4, 5], она является сложной функцией таких параметров, как мощность подогрева, температура охлаждающей воды, перепад давлений на насосе.

Следующие элементарные рассуждения иллюстрируют сказанное.

Обозначим  $w$  — среднюю поступательную скорость на входе в диафрагму 1 (фиг. 1),  $F$  — площадь сечения диафрагмы,  $n^{(1)}$  и  $n^{(2)}$  — концентрации компонентов 1 и 2 в бинарной смеси, поступающей в диафрагму;  $n^{(1)'}$  и  $n^{(2)'}$  — установившиеся концентрации этих же компонентов в анализаторе;  $Q^{(1)}$  и  $Q^{(2)}$  — величины быстроты откачки компонентов насосом 3<sup>1</sup>.

Тогда, пренебрегая сопротивлением тракта между диафрагмой и насосом, условия сохранения компонентов 1 и 2 смеси можно записать в следующем виде:

$$n^{(1)} F w = n^{(1)'} Q^{(1)}, \quad n^{(2)} F w = n^{(2)'} Q^{(2)}$$

Следовательно

$$\frac{n^{(1)}}{n^{(2)}} = \frac{n^{(1)'} Q^{(1)}}{n^{(2)'} Q^{(2)}}$$

где  $Q^{(1)}$  и  $Q^{(2)}$ , вообще говоря, неизвестные величины.

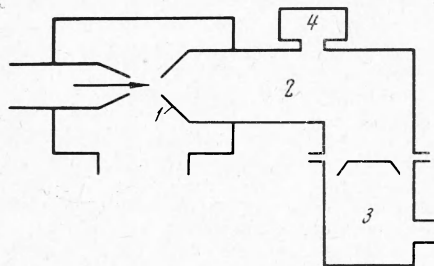
В устройстве, используемом в работах [6-9], анализатор подсоединяется со стороны предварительной откачки насоса 3. Полученные при помощи этого устройства экспериментальные данные будут верными лишь в том случае, если для откачки анализатора не используется дополнительный диффузионный насос. В случае использования указанного насоса пренебрежение селективностью его откачной способности может привести, как и при использовании устройств описанных выше, к заметной ошибке.

Аналогичное замечание можно сделать по отношению к устройству, описанному в работе [10]. Это устройство, кроме того, имеет еще один недостаток: геометрия диафрагмы в нем такова, что на полученных результатах сказывается селективность быстроты откачки основного насоса.

Помимо селективности откачной способности диффузионного насоса при определении состава потока, необходимо учитывать следующие факторы:

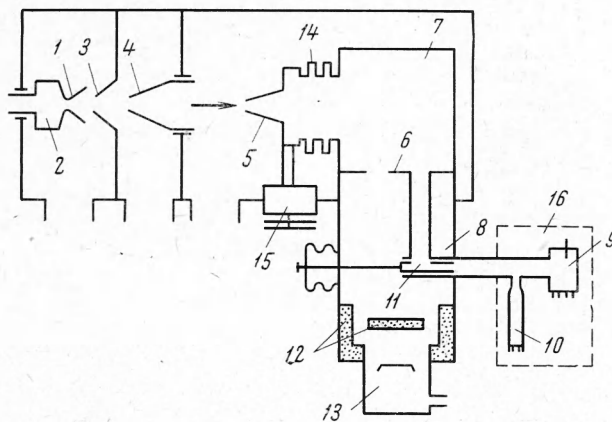
- 1) проникновение через диафрагму, наряду с молекулами исследуемого потока, молекул остаточного газа (фона), находящегося в рабочей камере;
- 2) газоотделение со стенок устройства.

<sup>1</sup> Здесь для простоты, как и в работах [1-3], полагается, что средние скорости компонентов одинаковы.



Фиг. 1

Очевидно, что влияние фона мало при исследовании состава относительно плотных потоков, но может быть существенно при определении концентраций в разреженных потоках. В свою очередь, газоотделение со стенок не играет особой роли при работе с инертными газами, но может иметь большое значение при исследовании состава потока, содержащего такие газы, как азот, кислород.



Фиг. 2

Описываемое ниже устройство было использовано для исследования молекулярного потока в установке с газодинамическим источником, идея которой принадлежит Кантровицу и Грэю [11]. Установки подобного типа получили к настоящему времени широкое распространение и описаны во многих работах. Обзор этих работ и обширная библиография содержатся в статье [12].

Схематическое изображение установки и предлагаемого измерительного устройства для определения парциальных интенсивностей представлено на фиг. 2.

Источником молекулярного потока в установке служит сверхзвуковое сопло 1, в котором смесь газов разгоняется до скоростей, превышающих тепловые скорости в форкамере 2. Часть получающегося на выходе из сопла потока попадает через первую диафрагму 3 в камеру коллиматора. Вторая диафрагма 4, помещенная на входе в рабочую камеру, формирует молекулярный поток. Камеры сопла и коллиматора, а также рабочая камера откачиваются вакуумными насосами.

Измерительное устройство откачивается дополнительным диффузионным насосом. Этим определяется сходство предлагаемого устройства с устройствами, используемыми ранее. Существенное же отличие заключается в том, что в нем измеряются не установившиеся концентрации в некотором сечении тракта, соединяющего диафрагму с насосом, а молекулярные потоки компонентов через этот тракт, причем указанные потоки измеряются при двух положениях насадки для отбора пробы: в исследуемом потоке и вне его. Именно в силу этого предлагаемое устройство позволяет не принимать во внимание селективность быстроты откачки диффузионного насоса, а также учесть наличие остаточного газа в рабочей камере, газоотделение и натекание в устройство.

Устройство для определения парциальных интенсивностей состоит из следующих основных элементов: насадка 5, тонкой перегородки с отверстием 6, первой камеры анализа 7, второй камеры анализа 8, измерителя парциальных давлений ИПДО-1 с омегатроном РМО-4С 9 [13], вакуумметра ВИТ-1 с манометрической лампой ЛМ-2 10, золотника 11, угольной ловушки 12, паромасляного насоса Н-1С 13, сильфона 14, координатника с тремя поступательными степенями свободы 15 и съемной печи 16.

Насадок 5 устройства служит для забора части исследуемого потока. Он выполнен таким образом, что поток, попавший в него, практически весь проходит в первую камеру анализа.

Перегородка с отверстием 6 предназначена для создания перепадов парциальных давлений компонентов между первой и второй камерами анализа. При известной проницаемости отверстия по этим перепадам можно определить потоки молекул компонентов через тракт устройства.

Золотник 11 позволяет подключать омегатрон 9 к первой или второй камере анализа и тем самым определять парциальные давления компонентов в этих камерах.

Угольная ловушка 12 препятствует попаданию в камеры анализа паров масла. Диффузионный насос 13 служит для откачки попадающего в устройство газа. Вместе с угольной ловушкой при отсутствии напуска в устройство он может обеспечивать в первой и второй камерах анализа давление соответственно не выше  $10^{-6}$  и  $10^{-7}$  мм рт. ст.

Сильфон 14 и координатник 15 позволяют выводить насадок 5 из исследуемого потока.

Съемная печь 16 служит для обезгаживания ламп РМО-4С и ЛМ-2. Печь обеспечивает прогрев ламп и близлежащих трубопроводов до 400° С.

Таким образом, описанное выше устройство позволяет измерять парциальные давления компонентов в первой и второй камерах анализа при двух положениях насадка: в исследуемом потоке и вне его.

Для того чтобы связать указанные давления с величинами интенсивностей соответствующих компонентов в исследуемом потоке, целесообразно ввести следующие дополнительные обозначения:  $p_c^{(v)}$  — парциальное давление  $v$ -го компонента в рабочей камере;  $p_k^{(v)}$  — парциальное давление  $v$ -го компонента в  $k$ -й камере анализа, когда насадок введен в исследуемый поток;  $p_k^{(v)*}$  — парциальное давление  $v$ -го компонента в  $k$ -й камере анализа при выведенном из потока насадке;  $N^{(v)}$  — число молекул  $v$ -го компонента, поступающих в единицу времени в первую камеру анализа за счет газотделения и натекая;  $K_1 / \sqrt{\mu^{(v)}}$  — проводимость насадка;  $K_2 / \sqrt{\mu^{(v)}}$  — проводимость отверстия, соединяющего камеры анализа, для  $v$ -го компонента и  $w^{(v)}$  — средняя скорость молекул  $v$ -го компонента.

Используя введенные обозначения, нетрудно записать условия сохранения числа молекул в первой камере анализа при введенном в поток и при выведенном из потока насадке

$$n^{(v)} F w^{(v)} + p_c^{(v)} \frac{K_1}{\sqrt{\mu^{(v)}}} + N^{(v)} + p_2^{(v)} \frac{K_2}{\sqrt{\mu^{(v)}}} = p_1^{(v)} \frac{K_1}{\sqrt{\mu^{(v)}}} + p_1^{(v)} \frac{K_2}{\sqrt{\mu^{(v)}}}$$

$$p_c^{(v)} \frac{K_1}{\sqrt{\mu^{(v)}}} + N^{(v)} + p_2^{(v)*} \frac{K_2}{\sqrt{\mu^{(v)}}} = p_1^{(v)*} \frac{K_1}{\sqrt{\mu^{(v)}}} + p_1^{(v)*} \frac{K_2}{\sqrt{\mu^{(v)}}}$$

Из этих условий можно получить

$$n^{(v)} F w^{(v)} = \frac{K_2}{\sqrt{\mu^{(v)}}} \left[ \frac{K_1}{K_2} (p_1^{(v)} - p_1^{(v)*}) + (p_1^{(v)} - \bar{p}_1^{(v)*}) - (\bar{p}_2^{(v)} - p_2^{(v)*}) \right] \quad (1)$$

В описываемом здесь устройстве отношение  $K_1 / K_2$  равно 0.033, а в принципе может быть сделано еще меньшим; равенство (1) можно заменить следующим приближенным равенством:

$$n^{(v)} F w^{(v)} = \frac{K_2}{\sqrt{\mu^{(v)}}} [(p_1^{(v)} - \bar{p}_1^{(v)*}) - (\bar{p}_2^{(v)} - p_2^{(v)*})] \quad (2)$$

Таким образом, если известны величины  $p_k^{(v)}$  и  $p_k^{(v)*}$ , равенство (2) дает возможность определить парциальные интенсивности компонентов смеси. Если же известны и величины скоростей  $w^{(v)}$ , равенство (2) дает возможность определить абсолютные концентрации молекул компонентов в исследуемом потоке.

Описанное устройство было использовано для определения парциальных интенсивностей компонентов в молекулярном потоке смеси азота с гелием.

В процессе проведения экспериментов изменялось давление в форкамере установки. Такие же параметры, как весовой состав смеси, поступающей в форкамеру (50% N<sub>2</sub> + 50% He), число Маха на входе в первую диафрагму (5.2), расстояние между входными сечениями первой и второй диафрагмы (47.5 мм), диаметры этих сечений (2.9 и 2.7 мм), расстояние между входным сечением второй диафрагмы и входным сечением насадка (273 мм), выдерживались постоянными.

Для компонентов бинарной смеси, используемой при выполнении данной работы, можно записать соотношения, аналогичные соотношению (2), положив  $v = 1$  для азота и  $v = 2$  для гелия.

Тогда отношение интенсивностей азота и гелия в потоке  $W$  будет определяться формулой

$$W = \frac{n^{(1)} w^{(1)}}{n^{(2)} w^{(2)}} = \left( \frac{\mu^{(2)}}{\mu^{(1)}} \right)^{1/2} \frac{(p_1^{(1)} - p_1^{(1)*}) - (p_2^{(1)} - p_2^{(1)*})}{(p_1^{(2)} - p_1^{(2)*}) - (p_2^{(2)} - p_2^{(2)*})} \quad (3)$$

Соответствующая формуле (3) зависимость отношения интенсивностей азота и гелия в потоке от давления в форкамере  $p_0$  мм рт. ст. представлена на фиг. 3 (кривая 1).

Кривая 2 на фиг. 3 построена без учета газоотделения со стенок устройства и проникновения в него молекул остаточного газа из рабочей камеры. При построении этой кривой использована формула

$$W = \left( \frac{\mu^{(2)}}{\mu^{(1)}} \right)^{1/2} \frac{p_1^{(1)} - p_2^{(1)}}{p_1^{(2)} - p_2^{(2)}}$$

получающаяся из формулы (3) при  $p_k^{(v)*} = 0$ .

Для построения кривой 3 использована формула

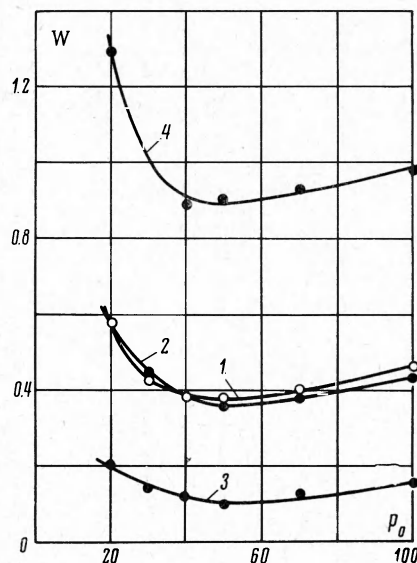
$$W = \left( \frac{\mu^{(2)}}{\mu^{(1)}} \right)^{1/2} \frac{p_2^{(1)}}{p_2^{(2)}}$$

т. е. сделано, как и выше, предположение, что газоотделением и фоном можно пренебречь, а также, что быстрота откачки  $v$ -го компонента диффузионным насосом обратно

пропорциональна  $\sqrt{\mu^{(v)}}$ .

Наконец, кривая 4 построена при предположении, что состав, установившийся в первой камере анализа, идентичен составу молекулярного потока, т. е. что

$$W = \frac{p_1^{(1)}}{p_1^{(2)}}$$



Фиг. 3

Сравнение кривых, приведенных на фиг. 3, показывает, что при количественном определении интенсивностей компонентов молекулярного потока, действительно, необходимо учитывать наличие газоотделения, натекания и особенно селективности откачной способности диффузионного насоса. Совершенно недопустимо отождествлять состав молекулярного потока с составом, установившимся за насадком.

В заключение остается отметить, что при той точности определения парциальных давлений, которая обеспечивается прибором ИЦО-1, относительная погрешность определения отношения интенсивностей компонентов смеси с помощью предложенной системы анализа не превышает 10%.

Поступила 22 IV 1963

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Waterman P. K., Stern S. A. Separation of Gas Mixtures in a Supersonic Jet. *J. Chem. Phys.*, 1959, vol. 31, N 5.
2. Stern S. A., Waterman P. K., Sinclair T. F. Separation of Gas Mixtures in a Supersonic Jet. II. Behavior of Helium — Argon Mixtures. *J. Chem. Phys.*, 1960, vol. 33, N 3.
3. Reis V. H., Fenn J. B. Separation of Gas Mixtures in Supersonic Jet. *J. Chem. Phys.*, 1963, vol. 39, N 12.
4. Миллерон Н., Левенсон Л. Способы улучшения высоковакуумных систем с большими масляными пароструйными насосами. Сб. «Современная вакуумная техника», М., Изд-во иностр. лит., 1963.
5. Цейтлин А. Б. Пароструйные вакуумные насосы. М., «Энергия», 1965.
6. Becker E. W., Schutte R. Das Trenndüsenverfahren. *Z. Naturforsch.*, 1960, Bd. 15a, N 4.
7. Bier K. Umkehrung der Trenndüsen — Entmischung in überexpandierten Gassstrahlen. *Z. Naturforsch.*, 1960, Bd. 15a, N 8.
8. Becker E. W., Bier K., Bier W. Steigerung der Trenndüsenentmischung von Isotopen durch leichte Zusatzgase. *Z. Naturforsch.*, 1961, Bd. 16a, N 12.
9. Becker E. W., Bier K., Bier W. Trenndüsenverfahren mit leichten Zusatzgas. *Z. Naturforsch.*, 1962, Bd. 17a, N 9.
10. Klingelhöfer R., Lohse P. Production of Fast Molecular Beams Using Gaseous Mixtures. *J. Phys. Fluids*, 1964, vol. 7, N 3.
11. Kontrowitz A., Grey J., High Intensity Source of the Molecular Beam. *Rev. Sci. Instr.*, 1951, vol. 22, N 5.
12. Френч Д. В. Молекулярные пучки, создаваемые источником сплошной среды. Ракетная техника и космонавтика, 1965, № 6.
13. Аверина А. П., Линник Л. Н., Никитина Г. И. Масс-спектрометры для измерения парциальных давлений в вакуумных системах. Приборы и техника эксперимента, 1965, № 4.