

Черепанов Анатолий Петрович,
д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: boning89@mail.ru

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ГАЗОВЫХ ЭЖЕКТОРОВ

Cherepanov A.P.

SETTING THE TASK OF CREATING EFFECTIVE GAS EJECTORS

Аннотация. Рассмотрена постановка задачи создания эффективных газовых эжекторов, основанных на закономерности чередующихся кольцевых зон разрежения при веерообразном распределении потока с образованием стоячих волн в зазоре. Поставлен ряд задач с целью обоснования параметров разрежения при эжектировании на основе уравнений газодинамики, а также обоснования практической применимости и полезности плоских эжекторов в энергетике, химической технологии и других отраслях промышленности.

Ключевые слова: безотрывное течение, зоны разрежения, зоны давления, зазор, размеры кольцевых зон, сопло, скачок уплотнения, стоячие волны, эжектор.

Abstract. The problem of creating efficient gas ejectors based on the pattern of alternating annular rarefaction zones with a fan-shaped flow distribution with the formation of standing waves in the gap is considered. A number of tasks have been set to substantiate the dilution parameters during ejection based on the equations of gas dynamics, as well as to substantiate the practical applicability and usefulness of flat ejectors in energy, chemical technology and other industries.

Keywords: continuous flow, rarefaction zones, pressure zones, gap, annular zone sizes, nozzle, seal surge, standing waves, ejector.

Эжектирование жидких или газообразных сред с использованием энергии струи активной среды широко используется в химической, нефтехимической, энергетической, пищевой, вакуумной и других отраслях промышленности для создания вакуума, перемешивания компонентов, транспортировки сред, а также в системах отсоса газов и пылеулавливания.

Эжекторы [1], содержащие сопло Лаваля, не позволяют использовать резонансное усиление за счет эффекта волнового течения в зазоре, имеют нерациональную геометрию камеры эжекции и зон разрежения, нерациональное использование энергии высокого давления, что из-за необходимости дросселирования создает низкую эффективность на нерасчетных режимах их работы.

Физическое, теоретическое и экспериментальное объяснение формированию стоячих волн разрежения и сжатия при подаче струи через боковое сопло установил и исследовал Г.Н. Абрамович [2, 3]. Условием возникновения чередующихся стоячих волн разрежения и сжатия при определенных соотношениях давлений и геометрии камеры или зазора, согласно этой теории, является безотрывное течение, обусловленное волновой природой течения сверхзвукового потока сжимаемых сред. Однако использование системы кольцевых зон разрежения, образующихся при волновом течении в зазоре, не рассматривалось для смешивания нескольких эжектируемых потоков.

Эжектор [4] формирует систему стоячих волн при поперечной подаче сверхзвуковой струи активной среды в камеру эжекции, образованную в зазоре между двумя стенками, через сопло, расположенное в центре одной из стенок, с образованием в камере эжекции центральной зоны разрежения, чередующихся кольцевых зон разрежения и кольцевых следов давления при подаче пассивной среды через кольцевые каналы, сообщающиеся с выбранными кольцевыми зонами разрежения в камере эжекции, и отводят смесь активной и пассивной сред из камеры эжекции. Аналогичное устройство [5] с подачей активной среды под давлением через сопло в зазор и смешивании с пассивной средой, которая всасывается через кольцевые каналы и отводит смешанный поток через зазор между стенками за пределами последнего кольцевого канала, дает возможность смешивания нескольких эжектируемых потоков. Однако двухсторонняя подача эжектируемых потоков в зазор не позволяет повысить разрежение и увеличить производительность, так как кольцевые каналы на стенках располагают навстречу друг другу на равных расстояниях от сопла, поэтому часть кольцевых каналов не задействована для создания разрежения. Хорошо исследованы и широко применяются газовые эжекторы [5, 6] с цилиндрической и конической камерами смешения типа сопла Лаваля, коэффициенты эжекции которых не превышают 5÷8.

Известные методики [2, 3, 5, 6] не содержат расчетных зависимостей для определения оптимальных геометрических параметров кольцевых зон разрежения с учетом волновой природы течения потока в зазоре. Анализ работ позволил установить, что известные методики дают только качественное описание волновой природы течения и не обеспечивает определение перепада давления в зонах с использованием волнового коэффициента, эффективной площади каждой зоны с учетом размытия их границ, учет влияния шероховатости поверхностей, количественной меры резонансного усиления параметров в зависимости от геометрии зазора, давления, радиуса зон и расхода при эжектировании среды. Не выявлены функциональные зависимости, связывающие длину волны с величиной зазора с числом Маха на входе сопла. Не установлена связь затухания резкости границ кольцевых зон по радиусу и числа Маха с фазовым углом. Отсутствует зависимость волнового коэффициента при определении эффективной площади и учета размытия границ кольцевых зон при волновом течении потока в зазоре, а также методики определения расходных характеристик, влияющих на эжектирование пассивной среды, не рассмотрены другие вопросы, связанные с конструированием плоских эжекторов.

Эжектор (рис.1) содержит основную стенку 1 и отражающую стенку 2 (крепление стенок 1 и 2 между собой на рисунке не показано), установленные друг относительно друга неподвижно и образуют зазор 3. В стенке 2 установлено сопло 4 диаметром d_c с кромкой 5 и выполнены кольцевые каналы 17, 18, 19, 20.

Эжектирование активного потока осуществляют подачей среды 6 под давлением P_0 через сопло 4 в зазор 3, где создается сверхзвуковое течение 7 с числом Маха $M_0 \approx 1,52$ и образует в зазоре 3 систему стоячих волн [2]. Стоячие

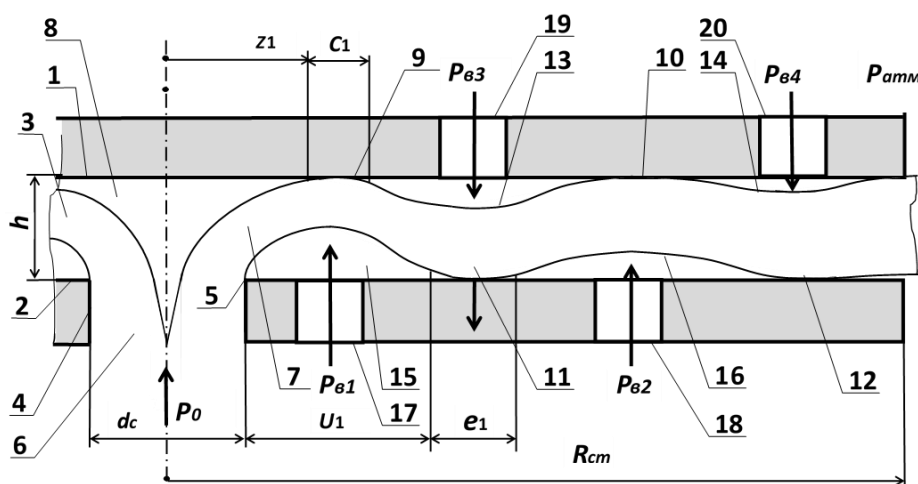


Рис. Эжектирование потока с использованием кольцевых зон разрежения

волны поочередно ударяются о стенки 1, 2 и отражаются от них, растекаясь кольцами, концентричными соплу 4. В местах касания стенок 1, 2 на них образуются следы давления 9, 10, 11, 12, чередующиеся с зонами разрежения 8, 13, 14, 15, 16. При этом напротив сопла 4 создается центральная зона разрежения 8 шириной z_1 . Далее со стороны отражающей стенки 1 образуются чередующиеся кольцевые следы давления 9, 10 и так далее шириной $c_1, c_2, \dots, c_n$, а между ними кольцевые зоны разрежения 13, 14 и так далее шириной $z_2, z_3, \dots, z_n$. При срыве с кромки 5 сопла 4 сверхзвуковое течение 7 образует кольцевые зоны разрежения 15, 16 и так далее шириной $u_1, u_2, \dots, u_n$, а между ними - следы давления 11, 12 шириной $e_1, e_2, \dots, e_n$ со стороны основной стенки 2. Кольцевые каналы 17, 18, 19, 20 установлены на окружностях, совпадающих со средними радиусами кольцевых зон разрежения 13, 14, 15, 16, поэтому эжектируемая среда $P_{B1}, P_{B2}, P_{B3}, P_{B4}$ под воздействием вакуума зон разрежения через кольцевые каналы 17, 18, 19, 20 всасывается в зоны разрежения и смешивается в зазоре 3 с эжектирующим потоком. За пределами радиуса R_{cm} стенок 1, 2 смесь сред отводится из зазора 3.

Таким образом, система стоячих волн [2] между двумя параллельными стенками камеры эжекции [4] при подаче эжектирующей среды под давлением P_0 и образования сверхзвуковой струи 7 эжектируемая среда всасывается в зазор из кольцевых каналов, образуя плоский многоступенчатый эжектор. Работа эжектора осуществляется в следующем порядке:

– в первом случае эжектируемую среду всасывают в первую кольцевую зону разрежения через первый кольцевой канал, расположенный на основной стенке;

– во втором случае эжектируемую среду всасывают во вторую кольцевую зону разрежения через второй кольцевой канал, расположенный на отражающей стенке, и смешивают с предыдущим смешанным потоком;

– в третьем случае эжектируемую среду всасывают в третью кольцевую зону разрежения через третий кольцевой канал, расположенный в основной стенке, и смешивают с предыдущими потоками;

– последующие эжектируемые среды всасывают в кольцевые зоны разрежения поочередно, то на отражающей, то на основной стенке, через кольцевые каналы, расположенные поочередно то на отражающей, то на основной стенке и далее смесь сред отводят из зазора за пределами стенок эжектора.

Из работы [4] известно, что ширину чередующихся кольцевых зон разрежения 8, 13, 14, 15, 16 и следов давления 9, 10, 11, 12 в радиальном направлении изменяют величиной давления эжектирующей среды 6, а также величиной зазора, который задают в пределах образования безотрывного течения потока 7 в зазоре 3. Размеры кольцевых следов определяют, например, по отпечаткам дисперсных микрочастиц с помощью метода цифровой трассерной визуализации (PIV) [7].

Эжектирование потока с использованием кольцевых зон разрежения, подачу активной среды через сопло в камеру эжекции и формирование в зазоре кольцевых зон разрежения изучалось в работе [9], однако, характеристики эжектора рассмотрены в ней только на принципиальном уровне.

Для создания теории расчета плоских эжекторных устройств и повышения их эффективности за счет использования максимального перепада давления в кольцевых зонах разрежения при волновом течении сверхзвуковой струи в зазоре между двумя параллельными стенками с учетом резонансного усиления необходимо решение следующих задач:

– обосновать отношение зазора к диаметру сопла из условия безотрывного волнового течения;

– обосновать возможность максимальной эжекционной способности;

– обосновать возможность определения эжекционного потенциала кольцевых зон разрежения как на основной, так и на отражающей стенке;

– определить максимально возможное количество кольцевых каналов для подвода эжектируемой среды и их расположение из условия максимума суммарного эжекционного потенциала;

– обосновать возможность регулировки величины разрежения эжектирующего потока в кольцевых зонах разрежения изменением избыточного давления потока в зазоре или изменением площади поперечного сечения центрального сопла;

- обосновать возможность регулировки величины разрежения изменением площади сечения зазора за счет радиуса основной и отражающей стенок;
- обосновать возможность изменения величины зазора при условии обеспечения в нем безотрывного течения потока;
- обосновать возможность изменения количества кольцевых зон разрежения и соответствующего им количества эжектируемых потоков и кольцевых каналов;
- изучить влияние шероховатости рабочих поверхностей, как показано в работе [10], на производительность, мощность и относительную эжекционную способность эжектора.

Для создания методик расчета многоступенчатых плоских эжекторов необходимы зависимости для определения геометрии кольцевых зон разрежения и кольцевых следов давления на обеих стенках зазора, зависимости для расчета зон разрежения и кольцевых следов давления на стенках при распространении волн в зазоре, зависимости для определения геометрии и режимных параметров, учитывающих влияние шероховатости поверхностей на параметры волнового течения. Необходимы поправочные коэффициенты для зон разрежения и давления, учета размытия границ между зонами и плавность и перехода от зон давления к зонам разрежения и наоборот. В методиках необходимо учитывать этапы формирования системы стоячих волн, включая подачу эжектирующего потока под давлением через сопло, расположенное в основной стенке перпендикулярно ее поверхности. За счет которого вследствие волновой природы течения в зазоре формируется система стоячих волн, что проявляется в образовании на обеих стенках чередующихся кольцевых зон разрежения и кольцевых следов давления. Геометрические параметры зон на первом этапе возможно экспериментальным методом цифровой трассерной визуализации (PIV) или по отпечаткам микрочастиц на стенках. На основе экспериментального метода необходимо создать расчетные методы определения размеров чередующихся кольцевых зон разрежения и кольцевых следов давления.

В целом разработанные методики должны обеспечить:

- выбор оптимальных зон для размещения каналов подвода эжектируемой среды, обеспечивающий более высокий эжекционный потенциал при компактном расположении каналов;
- определение ширины кольцевого канала в соответствии с шириной зоны разрежения из условия обеспечения проводимости, достаточной для отвода расчетного расхода эжектируемой среды;
- выбор количества кольцевых каналов подвода эжектируемой среды, обеспечивающих максимальную суммарную эжекционную способность при сохранении компактности устройства;
- определение сечения патрубков, сообщающихся с выбранными кольцевыми зонами разрежения;

- определение сечения диффузора для отвода смеси.

Решение поставленных задач позволит снизить потери кинетической энергии, повысить разрежение эжектируемого потока, увеличить производительность при создании эжекторов плоской конструкции, имеющих более высокий эжектирующий потенциал по сравнению эжекторами, проектируемыми на основе сопла Лаваля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2206409, МРоссийская Федерация, ПК F04F 5/00 (2006.01), Насадок Шестеренко : № 2001125157/12 : заявл. 10.06.2002 : опубл. 20.06.2003 Бюл. № 17 Патентообладатель: Шестеренко Николай Алексеевич. – 4 с.: ил. – Текст : непосредственный.
2. **Абрамович Г.Н.** Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч 1: Учеб. Руководство для Втузов. – 5 изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. Физ–мат. Лит., – 1991. – 600 с.
3. **Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенников С.Ю. и др.** Теория турбулентных струй. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Г.Н. Абрамовича. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1984. 716 с.
4. Патент № 2705695 Российская Федерация, F04F 5/44 (2006.01). Способ эжектирования потока и устройство для его осуществления: № 2018138405 : заявл. 30.10.2018 : опубл. 11.11.2019 / Черепанов А.П.: заявитель ФГБОУ ВО АНГТУ. – 11 с.: ил. – Текст : непосредственный.
5. Патент US 5584668 A (Volkman), МПК F04F 5/16; F04F 5/22; F04F 5/00, опубл. 17.12.1996.
6. **Цегельский В.Г.** К теории газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения / В.Г. Цегельский // Известия высших учебных заведений, 2012, № 2. С. 46–71.- URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-teorii-gazovyh-ezhektorov-s-tsilindricheskoy-i-konicheskoy-kamerami-smesheniya/viewer> (Дата обращения 12.02.2026).
7. **Соколов Е.Я.** Струйные аппараты. 3-е изд., перераб. / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
8. **Шустрова М.Л., Аминев И.М., Байtimiров А.Д.** Средства численного моделирования гидродинамических параметров процессов.-URL: <file:///sredstva-chislennogo-modelirovaniya-gidrodinamicheskikh-parametrov-protsessov.pdf> (Дата обращения 12.02.2026).
9. **Черепанов А.П., Ляпустин П.К., Ёлшин В.В.** Исследование расходящегося потока в зазоре между стенками с образованием кольцевых зон разрежения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. № 3(67). С. 22–31. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).22-31.
10. **Henderson B.** Experiments on the Impingement of a Supersonic Jet on a Flat Plate. J. Fluid Mech., 2002, Vol. 458, pp. 283 – 315. https://archive.org/stream/nasa_techdoc_20020088423.