

УДК 622.233

А.Д. Зозуля, Ф.А. Чакветадзе, Л.И. Мальцев

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОДАЧИ ПОТРЕБИТЕЛЯМ
ШАХТНОГО МЕТАНА ИЗ ДЕГАЗАЦИОННЫХ
СКВАЖИН УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования пристенных струй, вытекающих в атмосферу. Решается задача о струйном обтекании криволинейной дуги ограниченным потоком. На основе экспериментов выбраны безразмерные параметры, определяющие течение в струе.

Ключевые слова: струя, эжекция, метан, добыча, брызговой поток, модифицированное число Эйлера.

Из курса физики известно, что струи жидкости и газа, протекающие вблизи твердых границ имеют тенденцию притягиваться к этим границам. В качестве примера можно привести такой факт, что, если к струе воды, вытекающей из крана, поднести цилиндрическое число, то струя, коснувшись тела, притянется к нему и, частично огибая его, отклонится от своего первоначального направления.

В начале XX столетия Г. Коанда обратил внимание на прикладную сторону этого явления и широко его использовал в различных областях техники. Поэтому эффект притяжения струй к твердым стенкам связывают с именем Коанда.

В 1966 году состоялся первый европейский коллоквиум механиков, посвященный эффекту Коанда.

Эффект Коанда имеет место как в случае затопленных струй, так и при истечении струй жидкости в пространство, заполненное менее плотной средой, например, воды в атмосферу, который (эффект Коанда) называют еще эффектом «чайника» (1).

Отклоняются струи в обоих случаях благодаря перепаду давления, возникающему поперек струи и преодолевающему действие центробежных сил.

На внешней границе пристенной затопленной струи имеет место турбулентное перемешивание. Струя эжектирует жидкость из окружающего пространства. На обтекаемой твердой границе развивается пограничный слой. В результате, течение в струе является вихревым. Эжекция жидкости из окружающего пространства играет определяющую роль для затопленной струи.

Относ жидкости из ограниченного пространства между струей и прилегающей твердой границей приводит к понижению местного давления и возникновению его перепада поперек струи. При этом струя в начальный момент времени может находиться и на некотором расстоянии от стенки.

В то же время затопленная струя, в силу эжекции, при удалении от сопла постоянно расширяется, скорость в ней уменьшается, а давление повышается. Нарастание давления, в конце концов, приводит к отрыву струи

от стенки. Таким образом, эжекция жидкости сначала становится причиной притягивания струи к стенке, а потом ее отрыва.

Практические первые приложения эффекта Коанда имели место в варианте затопленной струи и были связаны с двумя наблюдениями:

- давление вблизи обтекаемой выпуклой стенки ниже, чем в окружающем пространстве, поэтому расход газа из сопла с приближением его к криволинейной выпуклой границе увеличивается;

- турбулентное перемешивание на внешней границе затопленной пристенной струи происходит более интенсивно, чем в свободной струе, благодаря чему эжекция газа из окружающего пространства возрастает (2).

Г. Коанда, а затем и другие использовали эти факты для улучшения характеристик всевозможных сопел, для очистки камер двигателей внутреннего сгорания, для увеличения коэффициента подъемной силы крыла самолета т.п.

В настоящей работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования пристенных

струй, вытекающих в атмосферу. Решается задача о струйном обтекании криволинейной дуги ограниченным потоком. На основе многочисленных экспериментов выбраны безразмерные параметры, определяющие течение в струе.

Течение в пристенной струе капельной жидкости со свободной внешней границей может быть рассмотрено в рамках модели потенциального течения идеальной жидкости.

Пристенные струи малой толщины не отрываются от стенки, оставаясь монолитными, а разрушаются вследствие неустойчивости внешней свободной границы.

Задача, результаты решения которой приводятся здесь, рассматривается при условии, что точка отрыва струи задана.

Экспериментальная принципиальная лабораторная схема струйного аппарата для повышения давления метановоздушной смеси (МВС) при подачи ее потребителям представлена на рис. 1. В результате многочисленных экспериментов выбор конфигурации центрального тела (поз. 1) имеет вид, представленный на рис. 1. Принципиальное отличие предлагаемого жидкостно-газового эжектора от

традиционных заключается в том, что вдоль оси вращения асимметричного эжектора в камере смешения установлено центральное тело (поз. 1), а сопло, формирующее струю рабочей жидкости, выполнено в виде кольцевой щели и обозначено буквой «h». Жидкость, вытекающая под давлением из щелевого сопла, тонкой струей омывает центральное тело (поз. 1). В силу эффекта Коанда (в опреде-

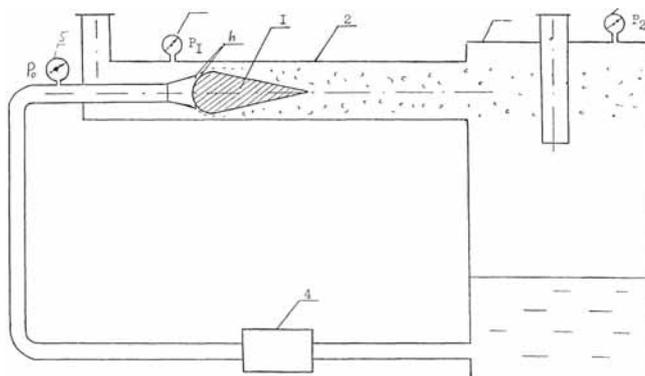


Рис. 1. Принципиальная схема струйного аппарата: 1 — центральное тело; 2 — труба; 3 — циклон; 4 — водяной насос; 5 — манометры

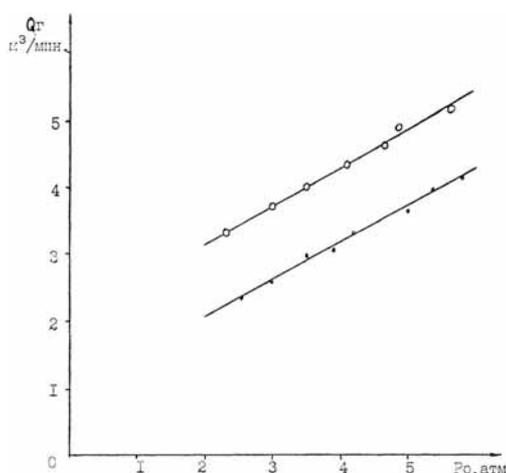


Рис. 2. Зависимость расхода газа от напора струи воды при $D = 130$ мм: $h = 1$ мм; $—\circ—$ $h = 2$ мм

ленных пределах) изменение линейной скорости истечения, струя безотрывно обтекает центральное тело (поз. 1), оставаясь монолитной (рис. 2).

Если рассматривать модифицированное число Эйлера:

$$E_m = \frac{P_\infty - P_0}{P_0 - P_{ж}} \cdot \frac{h}{r} > 2 \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

где P_∞ – полный напор внутри жидкостного сопла; P_0 – давление в камере смешения (поз. 2); $P_{ж}$ – кавитационная прочность жидкости; h – ширина щели на выходе из жидкостного сопла; r – радиус продольной кривизны обтекаемой стенки внутри сопла смешения.

То пристенная струя жидкости теряет устойчивость. На ее свободной поверхности образуются гофры или волны, гребни которых лежат в меридиальных плоскостях устройства.

Расстояния между вершинами волн находят по формуле:

$$\lambda = 2\pi(r + h)\sqrt{3/(1 + W_e)}, \quad (2)$$

где Число Вебера $W_e = \rho r v^2 / \gamma$;

v – среднерасходная линейная скорость жидкости; γ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; ρ – плотность жидкости.

Из формулы (2) видно, что с увеличением скорости истечения при прочих равных условиях величина λ убывает. При $r \approx 25$ мм, $h \approx 1$ мм, $v \approx 10$ м/с, рабочая жидкость – вода, величина $\lambda \approx 1,5$ мм. Если $v = 30$ м/с, то в тех же условиях $\lambda \approx 0,5$ мм.

С удалением от сопла амплитуда волн довольно быстро нарастает и, начиная с некоторого расстояния от него, до того монолитная струя распадается на пластинчатые вторичные струйки.

Диаметр цилиндрического корпуса жидкостно-газового эжектора, форма и размеры центрального тела (поз. 1) выбираются таким образом, чтобы пластинчатые струйки перекрывали все кольцевое пространство между внутренней стенкой корпуса и внешней границей центрального тела в районе его миделя. Газ, оказавшийся между пластинчатыми струйками, эвакуируется из приемной камеры в камеру нагнетания, чем и обеспечивается работа эжектора по перекачке и повышению давления МВС.

В результате взаимодействия струек жидкости и газа происходит разрушения струек жидкости и газа происходит разрушения струек и в диффузорной части эжектора формируется брызговой поток. Попадая в циклон, брызговой поток разделяется на жидкую и газовую фракции, после чего газ по центральной трубе уходит из циклона (поз. 3) в магистраль, а вода по стенкам циклона стекает на его дно и поступает на вход в водяной насос (поз. 4).

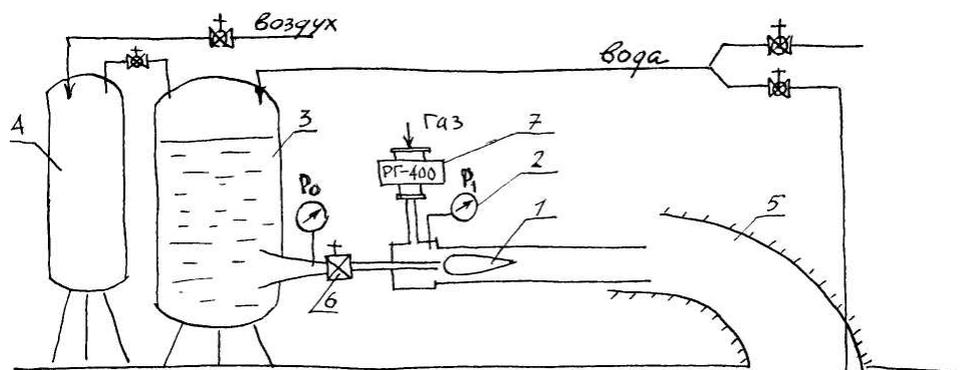


Рис. 3.: 1 — центральное тело; 2 — манометр; 3 — бак; 4 — ресивер; 5 — слив; 6 — задвижка; 7 — газосчетчик РГ-400

Экспериментальные исследования приводились в двух вариантах:

- вариант разомкнутой схемы — рис. 3;

- вариант замкнутой схемы — рис. 4.

Целью эксперимента было определение основных параметров жидкостно-газового эжектора, варьируя параметры:

- толщину жидкостной струи (0,5—3,0 мм);

- скоростной напор струи (0—6 кг/см²);

- ширину кольцевого зазора в зоне миделевого сечения центрального тела (10—45 мм).

Форма и размеры центрального тела (поз. 1, рис. 1) были неизменными. Диаметр тела в районе миделя был равен 60 мм. Центральная труба (поз. 2) для наглядности была выполнена из стекла с внутренним диаметром 70 мм.

Давление P_1 в камере разрежения эжектора и P_2 в камере нагнетания регулировалось при помощи заслонки на входе в эжектор и дросселя на выходе из трубы.

Гидродинамический напор регистрировался с помощью манометров, установленных в камере разрежения P_1 и камеры нагнетания P_2 (поз. 3).

Результаты испытания струйного аппарата в варианте замкнутой схемы

представлены на рис. 5. По оси ординат расход МВС Q_r колебался от нуля до 5 м³/мин, давление по оси абсцисс измеряется от нуля до 5 м³/мин, давление по оси абсцисс измерялось от нуля до P_0 в атм.

Зависимость расхода МВС от напора струи воды при диаметре центрального тела (поз. 1, рис. 1) равной 160 мм; 130 мм и 100 мм при ширине щели h щелевого сопла, формирующего водяную струю в эжекторе, составляла 1 мм и 2 мм.

На рис. 5 представлены зависимости расхода МВС при тех же параметрах, что и на рис. 6, когда ширина щели $h = 2$ мм, а диаметр центрального тела (поз.1, рис. 1) составляли 160 мм, 130 мм и 100 мм соответственно.

На рис. 6 представлены зависимости расхода МВС от давления в подводящем канале $P_0 = 5$ атм, $Q_r = 5$ м³/мин (максимальное), ширина щели щелевого сопла $h = 2$ мм при диаметре центрального тела $D_r = 25$ мм.

На рис. 2 представлена визуальная картина фотографии струи, обтекающую сферу диаметром 60 мм в стеклянной трубе диаметром 70 мм (поз. 2, рис. 1) в виде гофр или волн.

При анализе размерностей и выборе определяющих параметров было

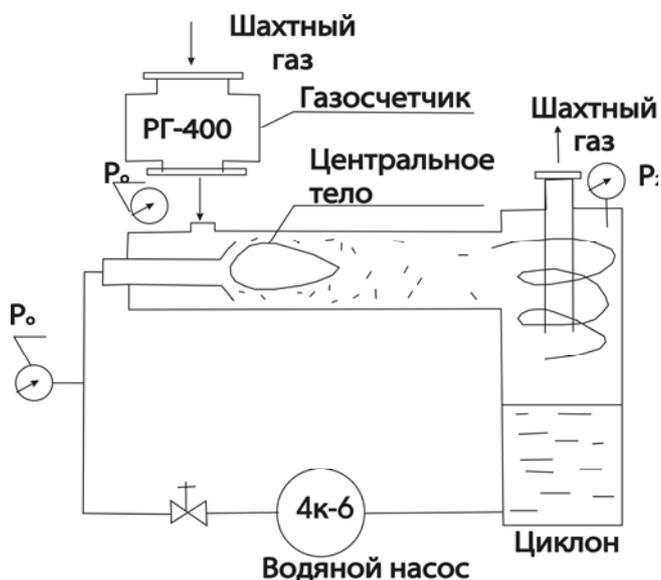


Рис. 4

отмечено, что основной характеристикой, очевидно, является угол, на который отклоняется водяная струя.

В случае малых толщин и в силу неустойчивости свободной границы, угол поворота струи определяется условиями разрушения.

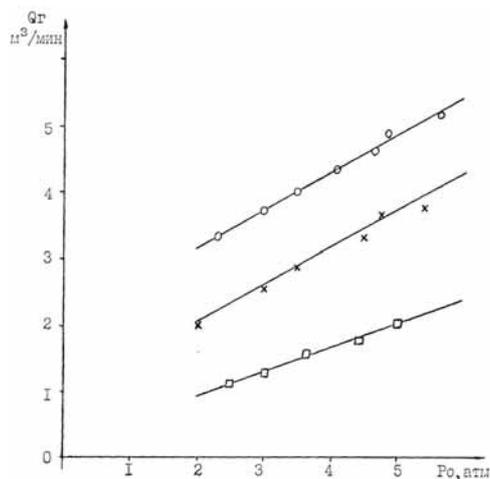


Рис. 5. Зависимость расхода газа от напора струи воды при $h = 2$ мм:
D: x – 160 мм; o – 130 мм; □ – 100 мм

Естественно, можно допустить, что в общем случае угол поворота пристенной струи зависит от плотности вытекающей жидкости ρ ; коэффициента поверхностного натяжения γ ; кинематической вязкости жидкости ν ; ускорения свободного падения g ; полного давления внутри сопла, формирующего струю, p_∞ ; давления вдоль свободной границы p_0 ; прочности жидкости на разрыв p^* ; толщины струи в месте ее истечения h ; продольного R_1 и поперечного R_2 радиусов кривизны обтекаемой

поверхности.

На основании теории размерностей и подобия, угол отклонения водяной струи зависит от шести безразмерных комбинаций:

- отношения h/R_1 ;

- отношения R_1/R_2 ;

- числа Фруда

$$Fr = \sqrt{(p_\infty - p_0)/(\rho g R_1)}$$

- числа Рейнольдса

$$Re = \sqrt{(p_\infty - p_0) R_1 h / \rho \nu^2}$$

- числа Вебера $We = 2(p_\infty - p_1) R_1 / Y$;

- модифицированного числа Эйлера

$$Em = [(p_\infty - p_0)/(p_0 - p_{ж})](h/R_1).$$

Числа Фруда, Рейнольдса, Вебера и Эйлера выражают соотношение сил инерции и, соответственно, сил веса, вязкости, поверхностного натяжения, давления.

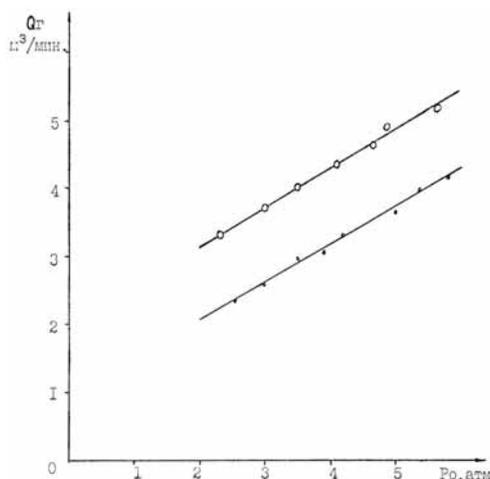


Рис. 6. Зависимость расхода газа от напора струи воды при $D = 130$ мм • - $h = 1$ мм.; о - $h = 2$ мм

Для проверки степени важности каждого из шести параметров была проведена специальная серия экспериментов.

Число Фруда проверялось только как ориентация оси сопла по отношению к направлению вектора ускорения свободного падения. Оказалось, что при линейных скоростях истечения больших 1—2 м/с, ни состояния свободной поверхности, ни угол при вершине конуса, образованного струей, не зависят от положений сопла. Следовательно, параметр g , а значит, и число F_2 можно опустить из числа существенных.

Приведенная здесь формула числа Рейнольдса была предложена Ньюманом (2). В случае затопленных струй этот параметр является определяющим в широком диапазоне изменения h/R_1 .

Рабочими жидкостями были: вода, глицерин, смесь воды и глицерина, раствор полиокса в воде.

Очень сильные отклонения в вязкости жидкости вносят существенные изменения в характер течения. Одна-

ко, при изменении кинематической вязкости жидкости в пределах $(1—20) \cdot 10^{-6}$ м²/с влияние на эффект Коанда несущественный и число Рейнольдса для этих случаев можно исключить из числа определяющих параметров.

Число Вебера, как было ранее показано, только при наличии поперечных возмущений длина наиболее неустойчивой волны независима от толщины струи и определялась равенством (2), а зависело от величины поверхностного натяжения растворов по сравнению с водой.

Таким образом, силы поверхностного натяжения оказывают некоторое влияние на развитие волновой картины на сводной поверхности струи.

Модифицированное число Эйлера E_m является от деления двух безразмерных комбинаций: $(p_\infty - p_0)/(p_0 - p_{ж})$ и умноженного на h/R_1 , что почти по существу выражает соотношение сил инерции и сил давления. Поэтому оно и называется модифицированным числом Эйлера.

Экспериментальные исследования, проведенные со сферой для различных сочетаний параметров h, R_1, v, Y , зависимости значения числа E_m и угла поворота, определяющего условия разрушения струи, близки между собой. Этот факт говорит о том, что параметр E_m в динамике пристенных струй жидкости со свободными внешними границами играет определяющую роль.

В струе жидкости, обтекающей выпуклую твердую границу, минимальное давление достигается вблизи стенки. В случае чистой жидкости, при наличии достаточных центробежных сил, струя может оторваться от стенки в силу нарушения взаимодействия твердой и жидкой фаз (адгезия) или жидкой и жидкой фаз (когезия). Работа адгезии всегда положи-

тельна и зависит от краевого угла смачивания (3). В диапазоне угла смачивания от 0° до 110° работа адгезии изменяется 20 кг/см^2 до $1,5 \text{ кг/см}^2$, т.е. жидкость у стенки может выдерживать значительные усилия на отрыв. Отношение работы адгезии к работе когезии выражается числом, всегда меньшим 1. Таким образом, в случае чистых жидкостей отрыв струи от твердой границы под действием центробежных сил всегда должен происходить непосредственно от стенки.

Итак, из шести безразмерных параметров, которые могли бы повлиять на течение в пристенной струе со свободной внешней границей, существенными остаются только три: W_e , E_m , R_1/R_2 . При этом, число Вебера является определяющим параметром в вопросе о развитии волн на поверхностях струй и несущественен при определении угла отклонения. Параметры E_m и R_1/R_2 существенны как при анализе волнообразования, так и при изучении вопроса об углах отклонения струй криволинейными поверхностями.

Проведены исследования аппарата для подачи потребителям шахтного метана из дегазационных скважин угольных шахт с использованием жидкостно-газового эжектора нового типа в автономном режиме. Экспериментальные испытания показали удовлетворительную работоспособность аппарата. Показано, что коэффициент инжекции предлагаемого эжектора может быть существенно увеличен по сравнению с существующими.

Необходимо выполнить обширные экспериментальные работы по выявлению отдельных геометрических, гидродинамических и энергетических параметров по нахождению определяющих размерных и безразмерных характеристик аппарата под заданные производительность и перепад давления, установить масштабные эффекты и т.д.

Кроме того, нужны проработки конструктивного характера, чтобы добиться надежного разделения газовой и жидкой фаз после эжектора, обеспечить регулировку аппарата по производительности и по давлению на входе и выходе из него.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taylor G.I.* Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. — *Phil. Trans.* — 1923. — V. A223. — P. 289—293.

2. *Taylor G.I.* The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction

perpendicular to their planes. I. — *Proc. Roy. Soc.*, 1950. — V. A201. — P. 289—293.

3. *Boundary layer and flow control.* Oxford ect. — 1961. — V.1. — 600 p.

4. *Зимон А.Д.* Адгезия жидкости и смачивание. — М.: Химия, 1974. — 420 с. **ГЛАВ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Зозуля А.Д., Чакветадзе Ф.А. — Институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов росгидромета, ipkmeteo@mescom.ru

Мальцев Л.И. — Институт теплофизики СО.АН.РФ.

