

0.025% (точки 2), 0.05% (точки 3) и 0.1% (точки 4), а вязкости 1; 1.18; 1.32; 1.86 *спз* соответственно. Объемная скорость нагнетания жидкости 100 *см³/час*.

Как следует из фиг. 4, увеличение концентрации ПАА в растворе от 0 до 0.1% приводит к заметному снижению относительной проницаемости пористой среды для полимерного раствора. Если говорить о нефтепроницаемости, то она возрастает для растворов, концентрация ПАА в которых не превышала 0.05%. При концентрации ПАА 0.1% нефтепроницаемость снизилась до величин, характерных для систем «нефть — вода». Указанное снижение нефтепроницаемости пористой среды при 0.1%-ной концентрации ПАА в растворе требует дополнительной экспериментальной проверки.

Таким образом, первые экспериментальные исследования влияния добавок полимера (полиакриламида) в воду на относительные проницаемости пористой среды позволили установить:

1. Кривые относительных проницаемостей для нефти и раствора ПАА сдвигаются вправо, что предопределяет более эффективное вытеснение нефти полимерным раствором, чем водой.

2. Увеличение концентрации полимера (ПАА) в растворе от 0 до 0.05% приводит к увеличению нефтепроницаемости и снижению проницаемости пористой среды для полимерного раствора.

3. Относительные проницаемости пористой среды для полимерного раствора внутри оторочки и за ней описываются одной и той же кривой; нефтепроницаемости участка пористой среды после прохождения через него полимерного раствора описываются кривой, соответствующей процессу вытеснения нефти водой.

Поступила 1 III 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Ентов В. М., Полищук А. М. О роли сорбционных процессов при движении полимерных растворов в пористой среде. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 3.
2. Ковалев А. Г., Покровский В. В., Алхазов Л. Б. Прямой метод определения фазовых проницаемостей в условиях, близких к пластовым (на образцах естественного песчаника). В сб. Исследования в области разработки нефтяных месторождений и физики пласта. М., 1972. (Всес. нефтегаз. н.-и. ин-т, сб. науч. тр. Вып. 44).
3. Дазнов В. Н. Промысловая геофизика. М., Гостоптехиздат, 1959.
4. Ентов В. М., Полищук А. М. Движение аномальных жидкостей в пористой среде. В сб. Реология. Полимеры и нефть. Новосибирск, 1977.
5. Вахитов Г. Г., Кац Р. М., Оганджанянц В. Г., Полищук А. М., Суркова Е. М. Одномерное вытеснение нефти водными растворами сорбирующихся агентов с учетом межслойных перетоков. Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 2.

УДК 533.6.011

ДЛИНА БОЧКИ КОЛЬЦЕВОЙ НЕДОРАСШИРЕННОЙ СТРУИ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ЗВУКОВОГО СОПЛА, ИМЕЮЩЕГО НА ОСИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ СТЕРЖЕНЬ

Ю. Я. БОРИСОВ, С. Л. ПОДОЛЬСКИЙ

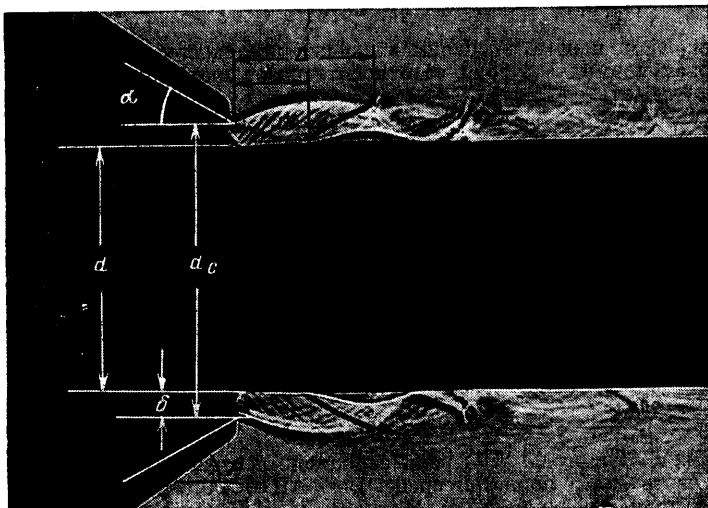
(Москва)

На кольцевых соплах с центральным стержнем, выступающим за пределы сопла, проведены исследования влияния толщины соплового зазора, кривизны последнего, угла конусности звукового сопла и перепада давлений на длину первой бочки недорасширенной струи. Получено выражение для расчета длины бочки в зависимости от указанных факторов для перепадов давлений свыше 4.4.

Известно, что при торможении сверхзвуковых струй полым резонатором [1] или даже просто плоским препятствием [2] возможно возникновение неустойчивых режимов течения, сопровождающихся появлением в струе периодических ударных волн, излучающихся в окружающее пространство в виде звуковых волн высокой интенсивности. В генераторе Гартмана, использующем этот эффект неустойчивости, применяется круглая недорасширенная струя, обычно истекающая из звукового конического или цилиндрического сопла [1] и реже — из сверхзвукового [3]. Такие струи хорошо изучены, поэтому расчет генератора Гартмана, сводящийся к опре-

делению размера резонатора и его местоположения по отношению к соплу и основанный на эмпирических соотношениях для размеров первой бочки недорасширенной струи, не вызывает затруднений.

В настоящее время для возбуждения в газах звуковых и ультразвуковых колебаний высокой интенсивности чаще применяются стержневые излучатели, работающие на том же принципе генератора Гартмана, но обладающие более высоким коэффициентом полезного действия. В таких излучателях используются кольцевые струи,



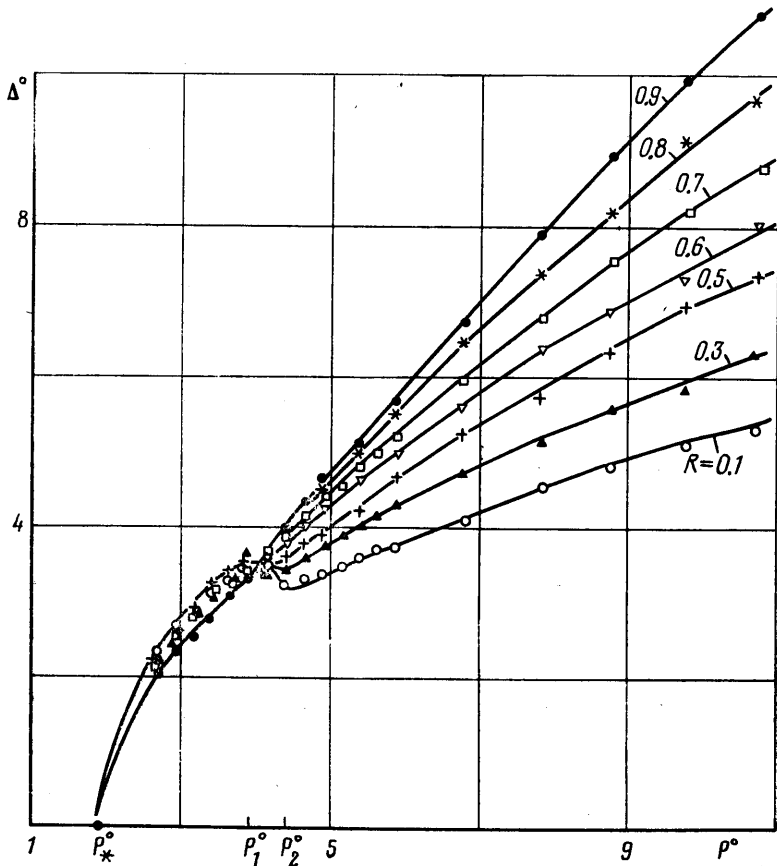
Фиг. 1

формируемые коническим соплом с цилиндрическим стержнем, расположенным по оси и выступающим за его пределы. Сопоставление этих двух типов излучателей приводит к заключению, что увеличение эффективности стержневых излучателей в значительной мере связано с изменением структуры струи, движущейся вдоль твердой поверхности. Однако данные о структуре таких струй крайне скудны. Достаточно сказать, что по существу нет даже расчетных формул для вычисления длины бочки Δ таких струй. Приведенная в [4], а затем преобразованная в безразмерный вид в [5] зависимость местоположения максимума статического давления, измеренного у поверхности центрального стержня, от параметров сопловой системы и перепада давления $P^0 = P_0 / P_\infty$ (P_0 — давление в форкамере, P_∞ — давление окружающей среды), хотя и дает представление о структуре такой струи, но ограничена узким диапазоном давлений (до 4.5 кг/см^2). К тому же если в круглых струях расстояние от среза сопла до максимума статического давления на оси совпадает с длиной бочки, определяемой обычно по месту выхода косога скачка на границу струи, то для кольцевого сопла с центральным стержнем такого совпадения между Δ и положением максимума давления, измеренным вблизи или на поверхности стержня, не наблюдается. Поэтому для определения Δ предпочтительны оптические измерения.

В связи с изложенным выше были проведены более подробные исследования длины первой бочки кольцевой струи при повышенных перепадах давления, а также оценено влияние угла конусности звукового сопла. Размеры первой бочки определялись путем обработки теневых фотографий струи, получаемых на пленке ФТ-41. Источником света служила импульсная лампа ИСП-400, дающая вспышки длительностью около 1 мксек с дополнительной оптической системой. Длина бочки Δ определялась по расстоянию от среза сопла до точки выхода первого косога скачка на поверхность струи (фиг. 1). Начало интервала неустойчивости [1], т. е. зоны, где продольный градиент статического давления меняет знак и становится положительным и где следует располагать резонатор для создания пульсирующего режима течения, определялось по точке X_1 , соответствующей появлению на стержне косога скачка и началу отрыва пограничного слоя. Исследования проводились на воздушных струях при изменении параметра кривизны струи R ($R = d / d_c$ — отношение диаметров стержня d и сопла d_c — см. фиг. 1) в пределах 0.1 – 0.9 , ширины сопловой щели $\delta = 0.5(d_c - d)$ от 0.25 до 5 мм и угла конусности сопла $\alpha = 0$ – 90° . Перепады

давления P° менялись в пределах 2.45–15.55, что полностью перекрывает диапазон, в котором в настоящее время работают газоструйные излучатели.

Ввиду того что в кольцевых, как и в плоских, струях определяющим параметром является ширина щели, все основные размеры нормировались к величине δ . На фиг. 2 приведена характерная зависимость нормированной длины бочки $\Delta^\circ = \Delta/\delta$ от P° , полученная на сопле с $d_c = 10$ мм и $\alpha = 24^\circ$. Аналогичные кривые получены для всех исследованных сопел, изменявшихся в пределах 4–15 мм. При этом оказалось, что начиная с $P_2^\circ = 4.4$ независимо от величины δ кривые, соответствующие



Фиг. 2

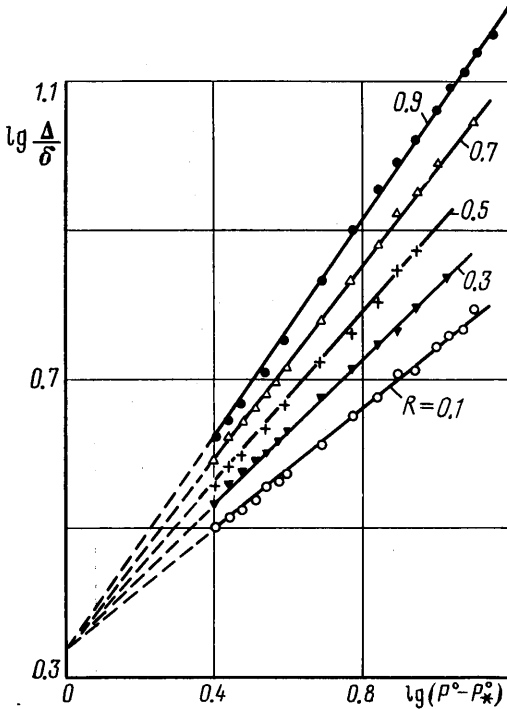
одинаковым значениям R , совпадают друг с другом и лишь при меньших перепадах имеют разный наклон, определяемый шириной щели.

С другой стороны, кривые Δ° по-разному ведут себя в зависимости от параметра R . Для струй с $R > 0.5$ кривые монотонно растут при увеличении P° во всем диапазоне перепадов давления, имея лишь небольшое изменение кривизны при $P_1^\circ = 3.9$. Иная картина наблюдается для струй с $R \leq 0.5$. Здесь возникает существенное отличие в характере изменения Δ° в областях до $P_1^\circ = 3.9$ и после $P_2^\circ = 4.4$. Более того, в указанном диапазоне от P_1° и P_2° рост длины бочки либо полностью прекращается, либо даже имеет место уменьшение Δ° ($R = 0.1-0.2$) с увеличением давления.

Следует отметить, что аналогичное явление временного прекращения изменения продольных размеров бочки наблюдается и на круглых струях ($R = 0$), правда, в диапазоне более высоких давлений ($P^\circ = 4.9-5.8$). Причем здесь это связано с появлением в струе диска Маха. Когда при $P^\circ = 4.9$ на оси струи возникает плоский скачок, его положение по отношению к срезу сопла и длина бочки в некотором диапазоне давлений стабилизируются. Увеличивается лишь диаметр диска Маха. И только начиная с $P^\circ = 5.8$ повышение давления вновь приводит к пропорциональному увеличению всех размеров бочки.

Для кольцевых струй «стабилизация» длины бочки не связана с появлением плоского скачка или тройной конфигурации скачков, так как здесь плоский скачок, по-видимому, не возникает, а тройная конфигурация (с висячим, отраженным и косым скачками) появляется лишь при $P^\circ > 6.5$. Судя по полученным фотографиям и по измерениям распределения статического давления на поверхности стержня, такая «стабилизация» объясняется изменением режима течения в пограничном слое у жесткой поверхности и структуры косоугольного скачка [6], который в этот период превращается из λ -образного в одиночный косоугольный большей интенсивности.

Из фиг. 2 видно, что при $P^\circ > P_2^\circ$ увеличение параметра R ведет к удлинению бочки, в то время как при $P^\circ < P_1^\circ$ слабо зависит от R , причем характер влияния R



Фиг. 3

оказывается противоположным. Исследования, проведенные на соплах с одинаковыми значениями параметра R , но разными величинами δ , показали, что для $P^\circ \leq 3.9$ ход кривых $\Delta^\circ = f(P^\circ)$ зависит от ширины сопловой щели, т.е. автомодельность в этом диапазоне давлений не имеет места. Что касается более высоких перепадов давлений ($P^\circ \geq 4.4$), то здесь, судя по полученным кривым, должна наблюдаться различная зависимость $\Delta^\circ = f(P^\circ)$ для струй с разными значениями R , что, впрочем, и следовало ожидать. Известно, что для круглых струй параметром автомодельности для $P^\circ > 10$ обычно служит нерасчетность струи n (или перепад давлений P° в степени 0.45–0.5 [6]). Однако уже для плоских струй характер зависимости от давления существенно меняется. Здесь длина бочки оказывается пропорциональной P° [7] или даже $(P^\circ)^{1.05}$ [8]. По-видимому, кольцевые струи занимают «промежуточное» положение между круглыми и плоскими. Если параметр кривизны велик ($R \rightarrow 1$), то характеристики таких струй должны приближаться к характеристикам плоских струй, а если $R = 0.1 - 0.2$ — к характеристикам круглой струи ($R = 0$). В соответствии с этим и должен меняться показатель степени B при P° .

Ввиду того что формирование ячеистой структуры в струе начинается не с $P^\circ = 0$, а с некоторого критического значения P_*° (для воздуха с отношением теплоемкостей $\gamma = 1.4$, $P_*^\circ = 1.89$), при получении зависимостей основных размеров бочки от давления в области сравнительно небольших перепадов ($P^\circ < 6$) обычно [1] в качестве параметра автомодельности используют разность давлений $(P^\circ - P_*^\circ)^2$. Этот же параметр и был применен при обработке полученных данных. Зависимость Δ° от $(P^\circ - P_*^\circ)$, построенная в логарифмическом масштабе (фиг. 3), показала, что для $P^\circ \geq 4.4$ имеет место линейная зависимость длины бочек от указанного параметра, причем угол наклона прямых пропорционален параметру R .

Обработка данных, полученных на соплах различного диаметра и при разных значениях R , но с одинаковым углом конусности $\alpha = 24^\circ$, позволила найти выражение для длины бочки кольцевого сопла с цилиндрическим стержнем на оси струи, дающее ошибку, не превышающую $\pm 4\%$:

$$\Delta/\delta = 2.19(P^\circ - P_*^\circ)^{0.375(1+R)}$$

Следует отметить, что для предельных величин параметра R (0 и 1) показатель степени $B = 0.375(1+R)$ приобретает значения 0.375 и 0.75, в то время как для свободных затопленных струй, как уже указывалось, соответствующие значения B имеют для цилиндрического сопла ($R = 0$) величину 0.5 и для плоского ≈ 1 . Из этого можно заключить, что для затопленных струй показатели степени при параметре, учитывающем влияние давления, на 33% больше, чем в случае движения аналогичных струй вдоль твердой поверхности. Соответственно при одинаковой сопло-

вой щели δ и равном значении P^* длина бочки в последнем случае оказывается заметно короче. Предположительно это связано со снижением расхода газа через сопло из-за уменьшения коэффициента расхода при деформации эпюры скоростей центральным телом.

В пределах исследованного диапазона давлений при $P^* \geq 4.4$ отношение расстояния от сопла до точки возникновения косога скачка к длине бочки является постоянной величиной $\eta = X_1/\Delta = 0.53-0.57$, причем меньшим значениям параметра R соответствуют большие величины η .

Как уже указывалось, для низких перепадов давлений $P^* < 3.9$ влияние R на длину бочки Δ^* оказывается более сложным и определяется еще величиной сопловой щели. Проявляющееся здесь сильное влияние пограничного слоя на стержне при малых значениях δ не позволяет в настоящее время получить единую зависимость Δ^* от P^* и R . По предварительным данным при $\delta \geq 2.5$ мм Δ^* не зависит от R , и показатель степени B при $(P^* - P_*^*)$ равен 0.5, т. е. оказывается таким же, как и для круглой струи. Для более «тонких» струй зависимость Δ от δ , R и P^* усложняется.

Учитывая, что изменение угла конусности звукового сопла влияет на коэффициент расхода [6] и на возникновение пограничного слоя, следует полагать, что угол α может влиять и на размеры бочки недорасширенной струи. Так, в [9] на круглых затопленных струях был обнаружен максимум длины бочки при угле $\alpha = 50^\circ$. Ввиду того что присутствие центрального стержня изменяет структуру струи, было проведено исследование влияния угла α на кольцевых струях для сопла с $d_c = 6$ мм ($R = 0.33-0.835$) в диапазоне давлений до $P^* = 10.7$. При этом, так как входной диаметр сопла оставался постоянным, коэффициент поджатия при разных значениях R менялся, однако последний не должен оказывать существенного влияния [9]. Внутренний угол сопла α менялся через 15° от $\alpha = 0$ (сопло Витовинского с удлиненной цилиндрической частью) до $\alpha = 90^\circ$. Наружный угол сопла β оставался постоянным и равным 90° с тем, чтобы не изменялись эжектирующие свойства сопла при изменении β . Впрочем, последующие исследования влияния угла β (проведенные для сопел с $\alpha = 15^\circ$ и $\beta = 30-90^\circ$) не показали какого-нибудь заметного изменения длины бочки.

В отличие от [9] на кольцевых струях не было обнаружено максимума для длины бочки при углах, близких к 45° , а наблюдалось ее плавное уменьшение с возрастанием угла конусности при всех исследованных значениях R и P . При этом максимальное изменение длины Δ^* составляет 18%. С учетом полученных результатов выражение для Δ^* при $P^* \geq 4.4$ ($P \geq 3.5$ кг/см²) имеет вид

$$\Delta^* = \frac{\Delta}{\delta} = 2.24 \left(1 - 0.152 \frac{\alpha}{90^\circ} \right) (P^* - P_*^*)^{0.375(1+R)}$$

Поступила 28 II 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Hartmann J., Mathes P., Mathes E., Lazarus F. The acoustic air-jet generator. Ingeniörvideenskabelige Skrifter, 1939, No. 4.
2. Гинзбург И. П., Семилетенко Б. Г., Терпигорев В. С., Усков В. Н. Некоторые особенности взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с плоской преградой. Инж.-физ. ж., 1970, т. 19, № 3.
3. Leśniak B. Investigation of the bases of ultrasonic generation in a flow-type equipment. Proc. Symp. Electroacoustic Transducers. Krynica, 1958. Warszawa, 1961.
4. Борисов Ю. Я., Гынкина Н. М. Исследование частотных характеристик газоструйных стержневых излучателей. В сб. Физика аэродинамических шумов. М., «Наука», 1967.
5. Борисов Ю. Я. Высокочастотные газоструйные излучатели повышенной мощности. Акуст. ж., 1978, т. 24, № 5.
6. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. М., «Энергия», 1974.
7. Wu J. H. T., Elabdin M. N., Neemeh R. A., Ostrowski P. P. Structure of a radially directed underexpanded jet. AIAA Journal, 1977, vol. 15, No. 11. (Русск. перев.: Структура недорасширенной струи, радиально истекающей через кольцевую щель. Ракетная техника и космонавтика, 1977, т. 15, № 11).
8. Sheeran W. J., Dosanjh D. S. Observation of jet flows from a two-dimensional underexpanded sonic nozzle. AIAA Journal, 1968, vol. 6, No. 3. (Русск. перев.: Исследование струи, истекающей из двумерного недорасширенного звукового сопла. Ракетная техника и космонавтика, 1968, т. 6, № 3).
9. Алешин А. И., Денисов И. Н., Рогачев Н. М., Сивиркин В. Ф. Исследование влияния угла конусности и степени поджатия звукового сопла на геометрическую структуру первой бочки недорасширенной струи. Инж.-физ. ж., 1975, т. 28, № 2.