АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XX 1974 Вып. 6

УДК 534.115

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОСТРУЙНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Б. С. Пашковский, Б. П. Тебеньков

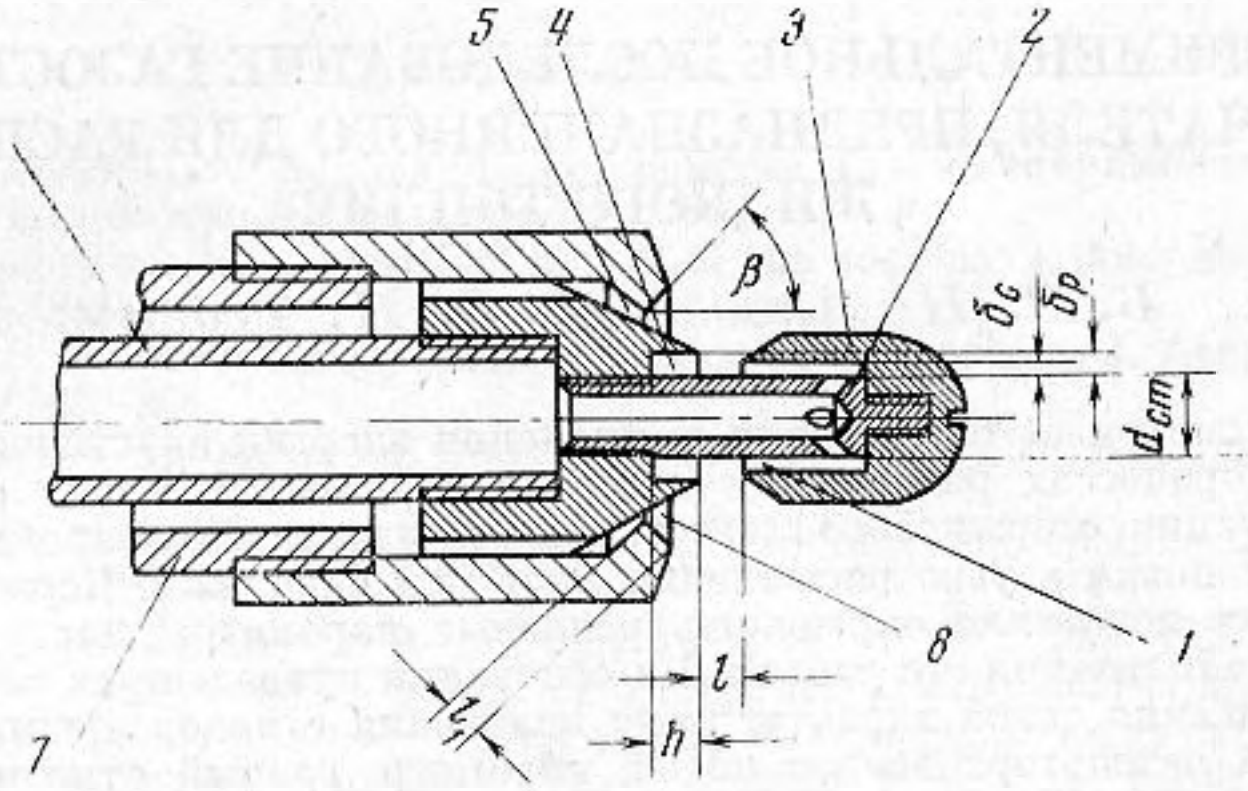
Рассматриваются условия применения энергии акустических колебаний в процессах распыления жидкого топлива. Найдена оптимальная конструкция стержневого газоструйного излучателя, предназначенного для установки в узел распыления мазутной форсунки. Исследование излучателя позволило определить основные параметры настройки и способы стабилизации его работы. На основании проведенных экспериментов для описания связи характеристик излучения с поперечными размерами сопла и резонатора введен новый параметр, равный отношению размеров их кольцевых зазоров. Подтверждено положение о том, что частота генерации стержневых излучателей определяется величиной зазора кольцевого сопла и давлением воздуха-энергоносителя. Приведена методика расчета газоструйных излучателей подобного типа.

Распыление жидкого топлива наряду со смешением его с воздухом является важнейшим этапом подготовки топлива к сжиганию. Попытки усовершенствовать процесс распыления привели к созданию новых усройств, в которых распыление жидкого топлива осуществляется в поле акустических колебаний [1].

Применение акустической энергии в промышленных условиях еще не достаточно распространено из-за отсутствия простых, надежных и достаточно эффективных акустических излучателей. Наиболее перспективными (с точки зрения дальнейшего совершенствования) считаются газоструйные излучатели стержневого типа, к достоинствам которых относятся малые габариты, простота конструкции, возможность получения значительных мощностей [2]. Акустические колебания в таких излучателях возникают при истечении струи газа или воздуха со звуковой или сверхзвуковой скоростью из сопла, против которого установлен резонатор. Однако существующие излучатели такого типа в случае использования их в узле распыления топливосжигающего устройства весьма ненадежны в условиях высоких температур, и повышение надежности их может быть достигнуто лишь путем существенного усложнения конструкции.

В данной работе приведены результаты исследований новой конструкции стержневого излучателя [3], наиболее полно отвечающей требованиям, связанным с применением для целей распыления и сжигания жидкого топлива. Номинальная производительность по топливу распылителя, сконструированного на основе этого излучателя, составляла 50 *кг/час*. Ввиду того, что однозначных рекомендаций по выбору удельного расхода воздуха-энергоносителя не имелось, значение этого параметра было принято таким же, как и у пневматических распылителей высокого давления, т. е. 1 *кг* на 1 *кг* топлива. На этом основании при расчете сечений воздуховодов для данного излучателя за исходный был принят расход воздуха 50 *кг/час* при избыточном давлении воздуха $p_в \approx 0{,}3$ *Мн/м*^{2} (3 *кгс/см*^{2}). Акустический распылитель представлен схематически на фиг. 1. Он содержит кольцевое сопло *1*, образуемое полым стержнем *2* и сопловым наконечником *3*, резонирующую камеру *4*, а также магистрали сжатого

воздуха *6* и топлива *7*. Воздух, являющийся источником колебаний, проходит внутри полого стержня и затем, изменив направление движения на 180°, из кольцевого сопла *1* попадает в резонатор *4*. Известно, что акустические колебания в подобных устройствах могут возникнуть при соответствующем подборе параметров δ_c, $\delta_р$, l и h, где δ_c и $\delta_р$ — соответственно ширина кольцевых зазоров сопла и резонирующей камеры, h — глубина резонатора, а l — расстояние между резонатором и срезом сопла.



Фиг. 1

Кольцевая щель *5* предназначена для подвода топлива в зону генерации. Такое конструктивное выполнение излучателя позволило сократить осевые размеры и обеспечить благоприятные условия охлаждения его деталей вследствие циркуляции воздуха внутри стержня и соплового наконечника, а также повысить частоту генерации (по сравнению с обычными излучателями стержневого типа).

Первоначально конструкция топливного сопла была выполнена в соответствии с общепринятыми правилами, т. е. остроконечной формы. Однако работа излучателя в данном режиме настройки существенно зависела от изменения величины $p_в$. Позднее было обнаружено, что топливные сопла, имеющие на выходе небольшое коническое расширение (*8* на фиг. 1), позволяют значительно повысить стабильность генерации излучателя. В связи с этим был опробован ряд топливных сопел с различной поверхностью конуса и различными углами β (см. фиг. 1). Результаты показали, что угол β при изменении его от 30 до 75° практически не влияет на мощность генерации и лишь несколько изменяет характеристику направленности излучателя. Решающим же фактором, влияющим на мощность и стабильность генерации, оказалась длина образующей конуса l_1. Наилучшие результаты были получены при $l_1=\lambda/4$, где λ — длина волны звука, генерируемого излучателем. Расстояние от кромки резонатора до места выхода топлива из сопловой щели в этих экспериментах выбиралось кратным $^1/_4 n\lambda$, где $n=1, 2, \ldots$ и т. д.

В связи с отсутствием данных по затратам энергии (как акустической, так и воздушного потока) в процессе распыления при выборе режима работы излучателя принимался во внимание тот факт, что процесс дробления струи топлива эффективно протекает при вполне определенных значениях амплитуды колебаний, а при снижении амплитуды качество распыления резко ухудшается независимо от изменения частоты генерации f [4]. В качестве оптимальной частоты генерации была выбрана частота на границе звуковой и ультразвуковой области. Действительно, при более высоких частотах для получения заданной амплитуды требуется резкое увеличение мощности излучения, а снижение частоты колебаний ниже

указанной границы может привести к снижению качества распыления и к ухудшению шумовых характеристик излучателя.

Известно, что амплитуда и частота колебаний зависят как от параметров настройки l и h, так и от соотношения диаметров сопла d_c и резонирующей камеры $d_р$, т. е. от параметра $K=d_р/d_c$, причем влияние последнего наиболее заметно сказывается на излучаемой мощности [5]. Поэтому исследование излучателя и было начато с определения оптимальной величины диаметра резонирующей камеры.

Наиболее интенсивная генерация наблюдалась нами при $K=1{,}0$; 1,1 и 1,2, что находится в некотором противоречии с данными ряда исследователей [6–8], рекомендующих выбирать K в интервале 1,5–1,7. При анализе этого явления было установлено, что все типы излучателей, которые описаны, например, в работах [7, 8], имеют достаточно большие кольцевые зазоры. Так, излучатель ГСИ-4 с $d_c=11$ *мм*, $d_{ст}=6$ *мм* и $d_р=17{,}5$ *мм* имеет ширину кольцевых зазоров $\delta_c=2{,}5$ и $\delta_р=5{,}75$ *мм*, что составляет соответственно 23 и 52,5% диаметра сопла, а это значительно больше, чем во всех исследованных вариантах нашего излучателя (здесь $d_{ст}$ – диаметр полого стержня).

Последующие эксперименты показали, что приведенные рекомендации по выбору параметра K справедливы лишь для излучателей, у которых величина δ_c составляет больше 15% от величины d_c. Это объясняется тем, что параметр $K=d_р/d_c$ не учитывает кривизну сопловой щели. Если же радиус кривизны сопловой щели приближается к диаметру сопла, то характер истечения изменяется и поток можно рассматривать как плоскопараллельный [5]. Совершенно очевидно, что в этом случае формула, учитывающая соотношение диаметров, теряет смысл.

Дальнейшие опыты показали, что более общую зависимость между характеристиками излучения и поперечными размерами сопла и резонатора можно получить, если учитывать не соотношение диаметров, а соотношение размеров кольцевых зазоров сопла и резонирующей камеры, т. е. ввести параметр

$$K_\delta=\delta_р/\delta_c. \qquad (1)$$

На фиг. 2 представлены графики, характеризующие звуковое давление на оси излучателя p_0 в зависимости от параметра K_δ при различных значениях δ_c. Из графиков видно, что оптимальное значение K_δ находится в интервале 2,3–2,6.

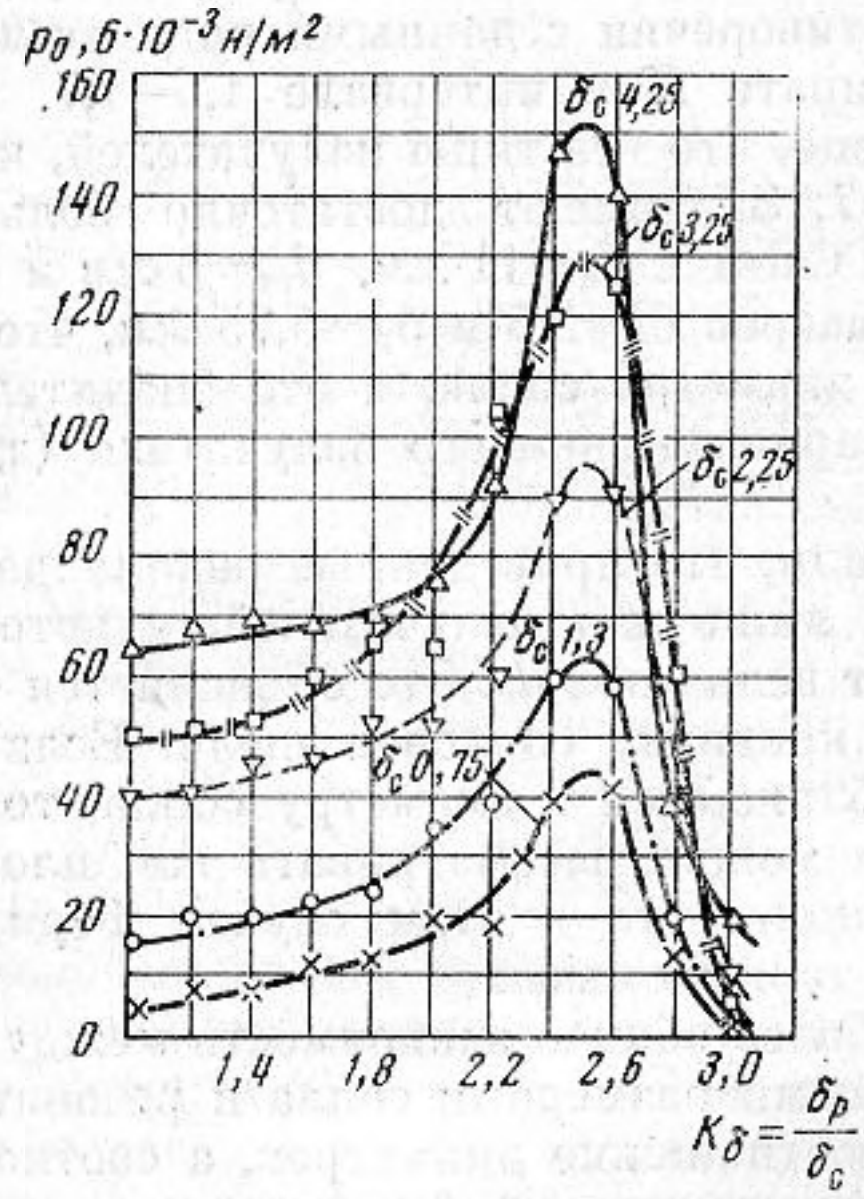
Определение акустических параметров излучателей производилось на специальном стенде [1], оборудованном в соответствии с требованиями, предъявляемыми к такого рода измерениям. В экспериментах по определению оптимального значения параметра K_δ пьезоэлектрический приемник звука устанавливался на оси излучателя на расстоянии 150 *мм* от него. Во всех опытах каждый вариант конструкции настраивался на максимум излучения подбором соответствующих значений l и h. Различие в величине звукового давления p_0 для разных вариантов излучателей объясняется тем, что количество энергоносителя в каждом случае было разным (вследствие изменения величины δ_c). С целью исключения влияния напора воздуха-энергоносителя давление его $p_в$ во всех случаях устанавливалось равным 0,3 *Мн/м*^{2}. Измерение величины $p_в$ производилось в подводящем турбопроводе, так как в условиях промышленной эксплуатации именно такой способ применяется в качестве контроля работы устройства.

Следует заметить, что критерий (1) справедлив и для других типов стержневых излучателей. Так, для излучателя ГСИ-4 параметр K_δ равен 2,3, т. е. находится в указанном выше интервале.

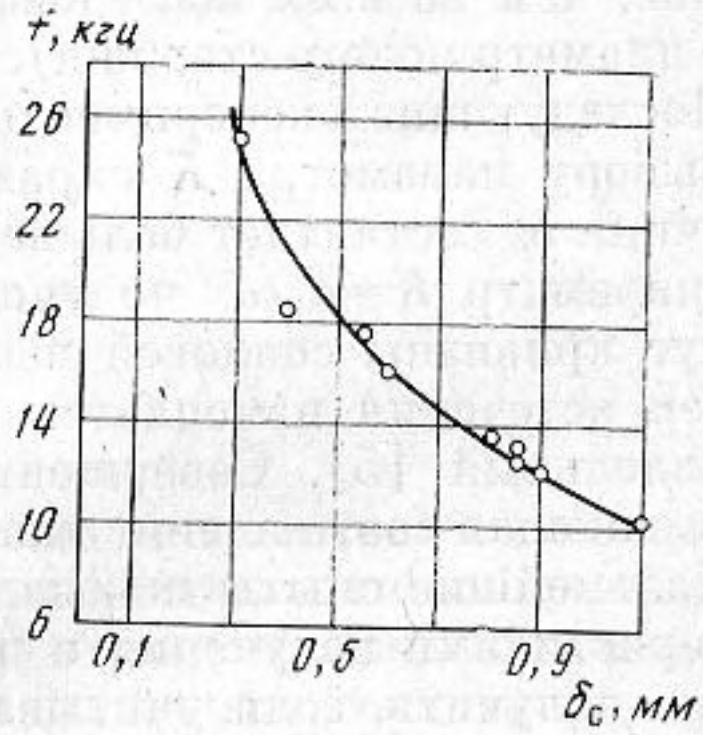
Акустические колебания в газоструйном излучателе возникают при вполне определенных расстояниях резонатора от сопла, определяемых положением зоны нестабильности [5]. Сложный характер истечения воздуха при различных формах и диаметрах сопел, а также различное влияние,

оказываемое резонатором (в зависимости от его диаметра, глубины и конфигурации) на распределение скоростей в струе, не позволяют заранее точно указать наилучшее положение резонатора в области нестабильности. Вероятно, по этой причине мнения исследователей по этому вопросу расходятся.

Чтобы исключить ряд факторов, влияющих на режим генерации, задача была сужена путем выделения класса газоструйных излучателей, имеющих следующие конструктивные особенности: воздушное сопло цилиндри-



Фиг. 2



Фиг. 3

ческой формы; ширина кольцевого зазора сопла $\delta_c \leqslant 0{,}1\ d_c$; кромка сопла острая, с углом конуса 30°; длина рабочей части сопла не менее 10 δ_c (имеется в виду расстояние от отверстий в стержне до среза сопла); суммарная площадь отверстий в стержне не менее чем в полтора раза больше площади выходного сечения сопла; соотношение размеров кольцевых зазоров резонирующей камеры и сопла $\delta_p/\delta_c = 2{,}5$; интервал изменения угла β—30—75°; $l_1 = {}^1/_4\lambda$; расстояние от кромки резонатора до места выхода топлива — ${}^1/_4 n\lambda$, где n — целое число; точность изготовления наиболее ответственных деталей излучателя ±0,05 *мм*.

Известно [9], что частота излучения практически полностью определяется величинами δ_c и $p_в$. Поскольку в наших опытах выполнялось условие $p_в = \text{const}$, частота излучения целиком зависела от величины δ_c. На фиг. 3 показана зависимость f от δ_c. График построен по данным исследований нескольких вариантов излучателей, конструкция которых удовлетворяла перечисленным выше требованиям, а параметры настройки l и h подбирались таким образом, чтобы получить максимальную мощность излучения.

Характер кривой, приведенной на фиг. 3, позволил получить эмпирическую формулу, связывающую частоту генерации и ширину кольцевого зазора в сопле;

$$f = A\delta_c^{-0{,}635\,(кгц)} \qquad (2)$$

где δ_c выражается в миллиметрах. Численное значение коэффициента пропорциональности A, зависящего от конструкции сопла, для

нашего случая оказалось равным 11,6. При пользовании этой формулой следует помнить, что она дает правильные результаты лишь в случае $p_в \approx 0{,}3$ *Мн/м²*.

Из графика фиг. 3 видно, что оптимальную частоту генерации (на границе между звуковой и ультразвуковой областью) имеет излучатель с $\delta_с = 0{,}6$ *мм*. Этот параметр и был выбран в качестве основной величины для расчета остальных размеров излучателя. Исходя из заданной производительности для исследований был отобран излучатель со следующими размерами: $d_{ст} = 10$ *мм*, $d_с = 11{,}2$ *мм* и $d_р = 13$ *мм*.

Чтобы правильно оценить качество работы исследуемых вариантов данного излучателя, для каждого значения h при соответствующем l снималось поле звукового давления в поперечном сечении трубы внутренним диаметром 140 *мм*. При этом излучатель снабжался параболическим рефлектором и соблюдались условия получения бегущей волны. Для повышения точности измерений значения звукового давления в симметричных точках усреднялись. В ходе опытов глубина резонирующей камеры h изменялась в пределах от 0 до 8 *мм* с интервалом 1 *мм*, а расстояние l — в пределах от 1 до 3 *мм* с интервалом 0,1 *мм*.

Оптимальное значение размера h оказалось равным 4 *мм* при $l = 2{,}7$ *мм*. Средний уровень звукового давления, измеренный на расстоянии 50 *мм* от излучателя, превышал при этом 150 *дб*, а частота генерации составляла около 16 *кгц*. Несмотря на то, что несколько большую интенсивность генерации имел излучатель с $h = 6$ *мм*, и $f = 8$ *кгц*, последний не может быть рекомендован в качестве основного варианта, так как уровень шума, возникающего при его работе, недопустимо высок. Частично это относится и к излучателю с $h = 5$ *мм*, $f = 13$ *кгц*, излучатель же с $h = 3$ *мм* и $f = 20$ *кгц* имел слишком низкую интенсивность излучения. При всех других значениях h интенсивность излучения была существенно ниже, чем в рассмотренных случаях.

Следует отметить и достаточно высокую стабильность работы излучателя с выбранными оптимальными параметрами, оборудованного топливным соплом с коническим расширением при $l_1 = 5$ *мм*. С соплом такой конструкции устойчивая генерация наблюдалась в интервале давлений воздуха-энергоносителя $0{,}25 \leqslant p_в \leqslant 0{,}35$ *Мн/м²*, причем интенсивность излучения в указанном интервале изменялась незначительно.

Ввиду отсутствия методов аналитического расчета газоструйных излучателей в настоящее время, как правило, лишь обобщаются экспериментальные данные и даются рекомендации по выбору того или иного параметра. Общую зависимость свойств от геометрических параметров для данного класса газоструйных излучателей следует искать в виде функции безразмерных параметров, отнеся величины $\delta_р$, l и h к $\delta_с$ как величине, определяющей режим генерации излучателя. В качестве безразмерных критериев подобия можно выбрать следующие коэффициенты:

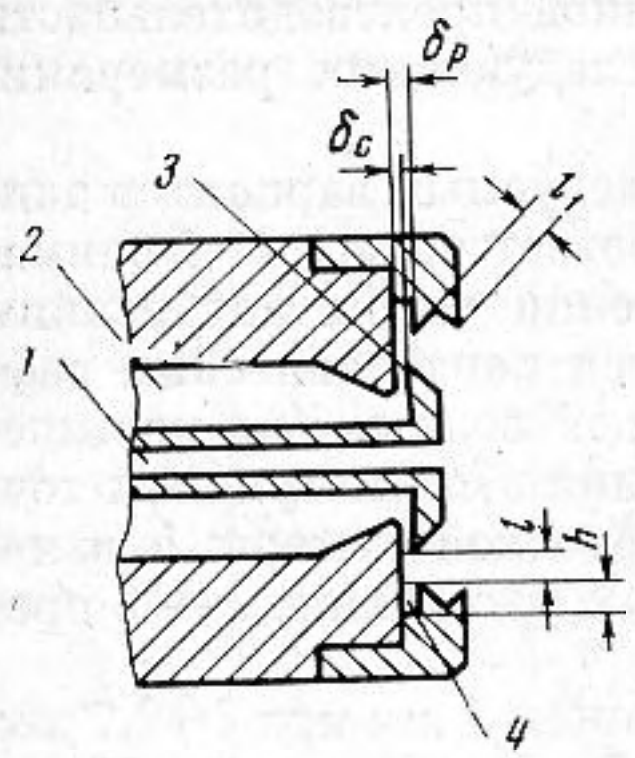
$$K_б = \frac{\delta_р}{\delta_с}, \quad L_б = \frac{l}{\delta_с},$$

$$H_б = \frac{h}{\delta_с}. \tag{3}$$

Для указанного класса излучателей значения безразмерных коэффициентов равны: $K_б = 2{,}5$; $H_б = 6{,}65$; $L_б = 4{,}5$. Если $p_в = 0{,}3$ *Мн/м²*, то для получения частоты генерации порядка 16 *кгц*, необходимо принять $\delta_с = 0{,}6$ *мм*. В этом случае параметры настройки l и h соответственно равны 2,7 и 4 *мм*. Для других значений частоты генерации величина $\delta_с$ определяется по формуле (2). Расчет значений $d_{ст}$ и $d_с$ проводится по известным формулам (см., например [10]) исходя из требуемого количества сжатого воздуха.

В этом случае, учитывая конструктивные особенности излучателя, целесообразно задаваться диаметром стержня. После определения диаметра сопла и стержня расчет остальных параметров производится с помощью известных значений коэффициентов $K_б$, $L_б$, $H_б$.

Расчет излучателей с другими значениями $p_в$ также можно выполнить, если не предъявляются требования к выбору частоты генерации. В этом случае в качестве обобщающей характеристики целесообразно использовать длину первой ячейки струи Δ_0, и тогда весь дальнейший расчет сводится к следующему. Сначала исходя из требуемой производительности (при выбранном $p_в$) определяем величину δ_c. Затем, зная δ_c и $p_в$, находим длину первой ячейки Δ_0 по формулам, приведенным в [11] для плоскопараллельного потока. Параметр $\delta_р$ определяется из формулы (1), а расчет остальных параметров производится при использовании в качестве безразмерных величин коэффициентов $L_\Delta=\Delta_0/l$ и $H_\Delta=\Delta_0/h$, численные значения которых ($L_\Delta=1{,}5$; $H_\Delta=1{,}0$) можно взять из результатов наших опытов.



Фиг. 4

Указанным методом был рассчитан новый тип излучателя с радиальным истечением энергоносителя [12] применительно к узлу распыления топлива. Схема такого устройства показана на фиг. 4, где буквенные обозначения те же, что и на фиг. 1. В этой конструкции топливо подается по центральному каналу *1*, а энергоноситель для возбуждения колебаний подается по магистрали *2* через плоское сопло *3*. В качестве резонирующей камеры служит тороидальная канавка *4*. Следует заметить, что исследование излучателей такого типа связано с большими трудностями, однако приведенный выше метод позволяет с достаточной точностью рассчитать излучатель с заданными рабочими характеристиками, минуя трудоемкие эксперименты.

Результаты опытов по определению качества распыления с помощью акустического устройства, представленного на фиг. 1, подтвердили высокую эффективность последнего. Эти опыты проводились с использованием метода моделирования парафином [13]. Ввиду того, что в данной конструкции излучателя невозможно добиться изменения частоты при постоянном значении интенсивности акустического излучения (сохраняя один и тот же расход сжатого воздуха), в программу исследований были включены эксперименты по определению характеристик распыления в зависимости от мощности генерируемых колебаний. Изменение мощности излучателя достигалось путем варьирования параметра l. Чтобы исключить влияние пневматического распыления, параметры сжатого воздуха во всех опытах поддерживались постоянными.

Проведенные эксперименты показали, что, хотя энергия акустических колебаний более чем на порядок меньше кинетической энергии воздушного потока, эффективность ее воздействия на струю распыляемой жидкости значительно больше. Так, например, в наших опытах установлено, что для уменьшения размеров капель со 120 до 110 *мкм* расход энергии воздушного потока необходимо увеличить на 6 *вт* на 1 *кг* жидкости, а энергия акустических колебаний, затрачиваемая с той же целью, оценивается величиной 0,15 *вт* на 1 *кг*, т. е. в 40 раз меньше. Благодаря этому для получения дисперсного состава топливного тумана со средним диаметром капель около 100 *мкм* удельный расход сжатого воздуха в рассмотренном распылителе составляет 0,2—0,3 *кг* на 1 *кг* расплавленного парафина [10], в то время как в пневматических распылителях высокого давления для получения таких же результатов этот расход необходимо повышать до 1 *кг* на 1 *кг* парафина и более.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Б. С. Пашковский, Б. П. Тебеньков.* Исследование условий применения энергии акустических колебаний для распыливания жидкого топлива. В кн.: Печи и сушила машиностроительной промышленности. Сб. трудов, вып. 19. М., 1972 (Минмонтажспецстрой СССР, Главтепломонтаж, ВНИПИ Теплопроект).
2. *Б. С. Пашковский.* Физические основы работы форсунок с аэродинамическими генераторами колебаний. Исследование горелочных устройств для печей машиностроительной промышленности. Сб. трудов, вып. 10. М., ЦБТИ, 1969 (Минмонтажспецстрой СССР, Главтепломонтаж, ВНИПИ Теплопроект).
3. *Б. С. Пашковский, В. Я. Гилод.* Акустический распылитель жидкости. Авт. свид. № 325044, Бюл. изобрет., № 3, 1972.
4. *R. Wilcox, R. Tate.* Liquid atomization in high intensity sound field. Amer. Inst. Chem. Engineering J., 1965, *11*, 1.
5. Источники мощного ультразвука. Под ред. Л. Д. Розенберга. М., «Наука», 1967.
6. *H. O. Monson, R. C. Binder.* Intensities produced by jet – type ultrasonic vibrators. J. Acoust. Soc. America, 1953, *25*, 5, 1007.
7. *Ю. Я. Борисов, В. Н. Гинин, Н. М. Гынкина.* Разработка и исследование стержневого газоструйного излучателя ГСИ-4. Акуст. ж., 1965, *11*, 2, 140.
8. *Р. И. Школьникова.* Воздухоструйные генераторы акустических колебаний для коагуляции аэрозолей. Акуст. ж., 1963, *9*, 3, 368.
9. *Ю. Я. Борисов, Н. М. Гынкина.* Исследование частотных характеристик газоструйных стержневых излучателей. В сб.: Физика аэродинамических шумов. М., «Наука», 1966.
10. *В. Я. Гилод.* Сжигание мазута в металлургических печах. М., «Металлургия», 1973.
11. *Бай Ши-и.* Теория струй, М., Физматгиз, 1960.
12. *Б. С. Пашковский, В. Я. Гилод.* Акустический распылитель. Авт. свид. № 328945, Бюл. изобрет. № 7, 1972.
13. *Л. В. Кулагин.* Методы измерения размеров капель при распыливании. В кн.: Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении, Межвузовский сб. № 2, М., Машгиз, 442, 1960.

Всесоюзный научно-исследовательский
и проектный институт «Теплопроект»

Поступила
9 апреля 1973 г.