

АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXVII

АКАДЕМИЯ

Ноябрь

1981

НАУК

Вып. 6

СССР

Декабрь

Основан в 1955 г.

Москва

Выходит 6 раз в год

УДК 534.232+621.762

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМОАКУСТИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ ДЛЯ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

*Абрамов О. В., Борисов Ю. Я., Оганян Р. А.,
Подольский С. Л.*

Исследован трубчатый газоструйный излучатель (для пневмоакустического распылителя). Найдены оптимальные соотношения системы сопло — резонатор для получения высоких уровней звукового давления в зоне распыления. Показана возможность усиления колебаний с помощью проходного цилиндрического или тороидального резонаторов. Приведены результаты лабораторных и полупромышленных испытаний форсунки.

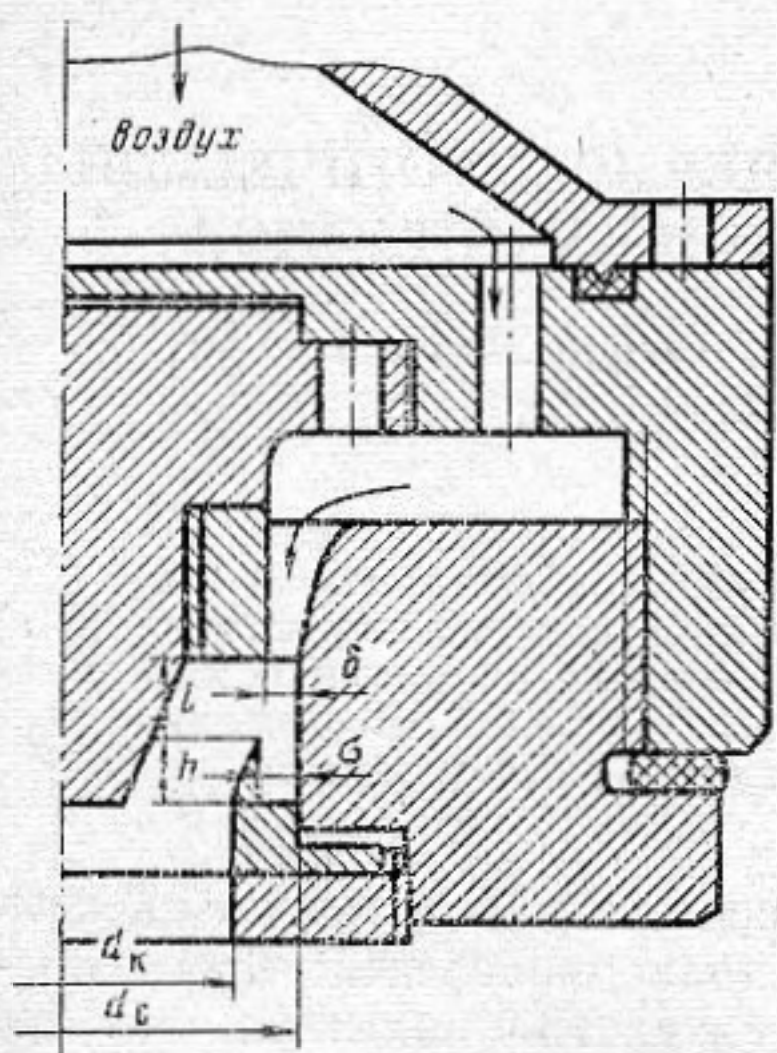
Одна из задач порошковой металлургии состоит в разработке методов и оборудования для получения однородных мелкодисперсных металлических порошков. Исследования последнего десятилетия показали, что интенсивные акустические колебания, создаваемые в газовой среде, с успехом могут применяться для тонкого распыления разнообразных жидких продуктов, в том числе и таких материалов, обладающих большим поверхностным натяжением, как жидкие металлы [1]. Поэтому пневмоакустический метод, сочетающий возможности высокоскоростного пневматического и вибрационного методов распыления, представляет несомненный интерес для порошковой металлургии.

Однако, несмотря на сообщения о разработке и серийном выпуске ряда конструкций акустических форсунок [2], в литературе почти нет рекомендаций по выбору типа акустического преобразователя и оптимальных геометрических размеров излучающей системы. К тому же специфика разлива расплавленного металла, не допускающая подачу жидкости в зону диспергирования в виде тонких струек или пленки, успешно применяемую при распылении большинства жидкостей, не позволяет использовать известные конструктивные решения. Поэтому при разработке пневмоакустической форсунки, предназначенной для получения металлических порошков из высокотемпературных расплавов, за основу был взят один из вариантов пневматического распылителя, в котором струя металла дробится высокоскоростным воздушным потоком, создаваемым кольцевым соплом, концентрично расположенным относительно оси металлопровода.

В качестве акустического источника был выбран газоструйный излучатель, работающий по принципу генератора Гартмана, так как с его помощью могут быть получены высокочастотные упругие колебания с весьма большой амплитудой. Так как металлы обладают большим поверхностным натяжением, в значительной мере определяющим стабильность

жидкой пленки или капли, необходимо максимально увеличить уровень звукового давления (и соответственно амплитуду колебательной скорости) в зоне выхода струи металла из металлопровода. Поэтому одна из задач при разработке форсунки состояла в рациональном расположении зоны генерации излучателя по отношению к соплу металлопровода. Вторая задача сводилась к оптимальному использованию энергии высокоскоростной струи отработанного газа. В конечном итоге эти требования были выполнены за счет приближения зоны генерации к соплу металлопровода и использования излучателя специальной конструкции.

После опробования ряда вариантов, отличавшихся в основном углом наклона резонатора относительно оси форсунки (применялись конические,



Фиг. 1. Экспериментальный излучатель, предназначенный для определения оптимальных режимов настройки трубчатого варианта

энергию непосредственно вблизи сопла металлопровода, находящегося на оси трубы, и одновременно рационально использовать струю отработанного газа.

Подобная конструкция, по-видимому, никем не исследовалась, поэтому следовало провести акустические измерения в широком диапазоне изменения основных настроечных параметров излучателя. При этом исходные размеры сопловой системы были максимально приближены к проектируемому промышленному варианту (при диаметре металлопровода 10 мм диаметр газового сопла составил ~ 27 мм). На фиг. 1 приведено схематическое изображение исследованного модельного излучателя, не имеющего металлопровода, и обозначены основные конструктивные параметры, определяющие его работу. Для выбора диапазона изменения этих параметров следовало определить длину бочки исследуемой струи. Ввиду отсутствия расчетных формул для струй, движущихся вдоль вогнутой стенки, вычисления были сделаны для аналогичной струи, но текущей вдоль выпуклого стержня [4], хотя из-за сжатия потока в азимутальном направлении реальная длина бочки должна быть несколько больше. Используемое в пневматических форсунках давление воздуха обычно составляет 10 кгс/см^2 ; поэтому расчет длины бочки, нормированной к ширине сопловой щели, при реально существующем в камере излучателя перепаде давлений (по отношению к окружающей атмосфере) 8,5 дает значение $\Delta/\delta = 8,8$. По нашим предварительным данным, для внутренней струи это отношение должно быть увеличено на 10–15%.

дисковые [3] и стержневые конструкции), основное внимание было сосредоточено на трубчатом варианте стержневого излучателя, как наиболее отвечающем поставленной задаче. Дело в том, что в форсунках со стержневым излучателем при обычно применяемой схеме подачи жидкости через полый стержень жидкостное сопло оказывается за пределами резонатора. Поэтому выходящая жидкость находится в области расходящейся сферической волны, вне зоны генерации, где и наблюдаются максимальные звуковые давления. Трубчатый же вариант представляет собой стержневой излучатель, как бы вывернутый наизнанку и излучающий не во внешнее пространство, а внутрь себя, в трубу. В таком излучателе газовая струя остается цилиндрической, но она движется вдоль внутренней стенки трубы, на которой и располагается кольцевой резонатор. В такой конструкции вблизи зоны генерации акустические волны оказываются сходящимися, что позволяет концентрировать

Ширина сопловой щели δ в опытах изменялась в пределах 0,4–0,8 мм путем установки сопловых колец разного диаметра, а ширина резонаторной полости ($\sigma=1\div 2,5$ мм) и ее глубина ($h=1,5\text{--}3,5$ мм), изменявшиеся через 0,5 мм,— путем использования набора сменных резонаторов. Расстояние между соплом и резонатором l менялось в пределах 1,5–4,5 мм с шагом 0,25 мм. На выходе излучатель имел небольшую проходную цилиндрическую камеру диаметром $d_k=20$ мм (см. фиг. 1).

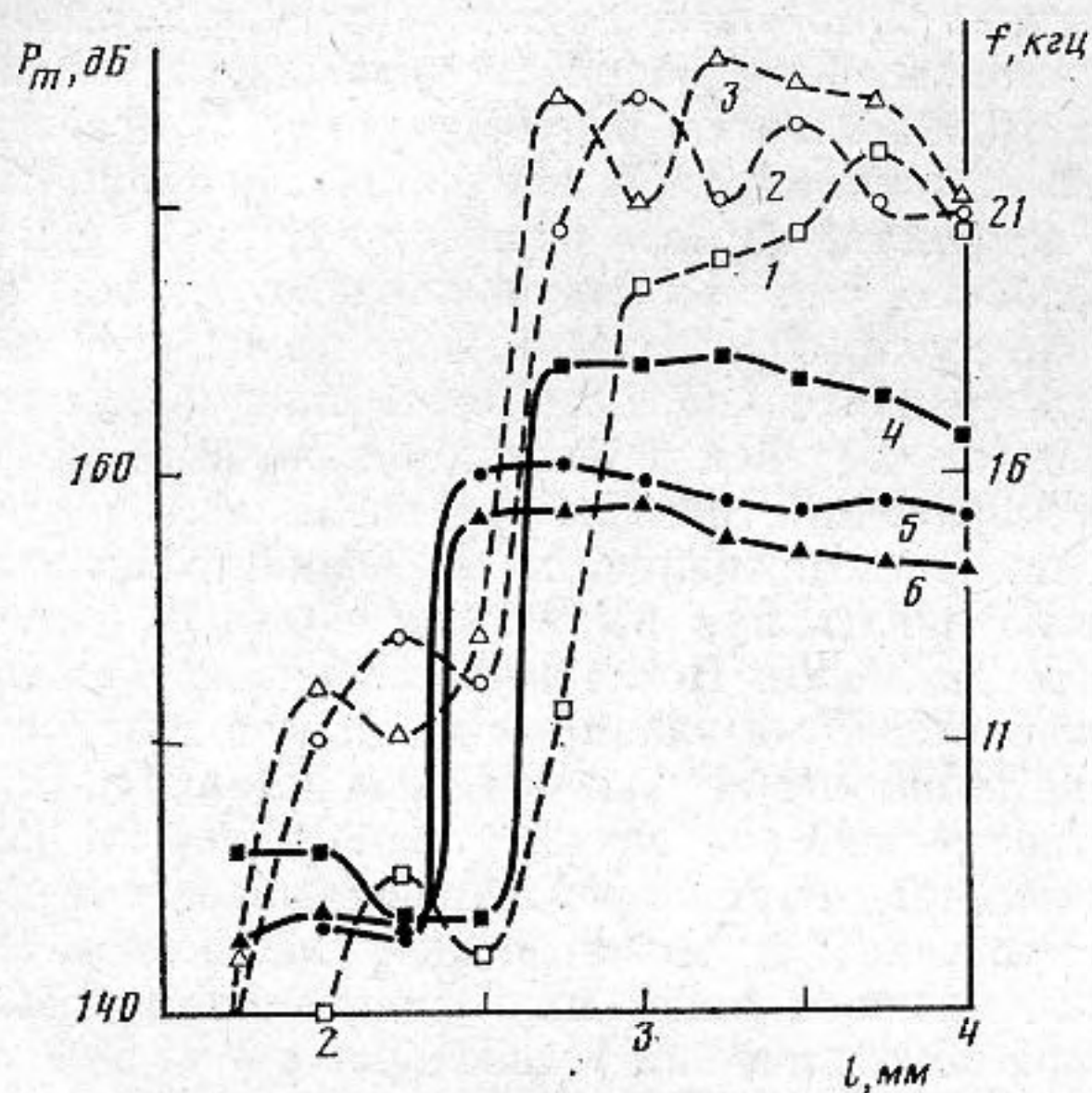
В форсунках, предназначенных для распыления жидкого топлива, акустические колебания не только интенсифицируют процесс диспергирования, но одновременно влияют и на диффузионные процессы смешения топлива с окислителем и горения, поэтому для них предпочтительно использование излучателей, обладающих высокой акустической мощностью, т. е. способных излучать энергию в пространство. В проектируемой форсунке для жидкого металла акустическое воздействие направлено лишь на диспергирование жидкости, которое осуществляется в ближнем поле излучателя, следовательно, для нее излучение в пространство не является обязательным. Поэтому преобразователь, используемый в таком распылителе, может иметь сравнительно невысокий пневмоакустический КПД, важно лишь, чтобы он создавал в ближнем поле высокие уровни звука. Исходя из этих соображений, при выборе оптимальных режимов работы преобразователя мы ориентировались не на величину излучаемой мощности, что необходимо делать при испытании обычных излучателей, а на величину звукового давления. Последнее измерялось непосредственно за резонатором вблизи сопла металлопровода с помощью конденсаторного микрофона типа 4138 фирмы «Брюль и Кьер» (Дания). При измерениях использовался гетеродинный анализатор типа 2010 той же фирмы.

Исследование влияния ширины резонансной полости σ на уровень звукового давления, создаваемый в зоне распыления, показало, что независимо от величины сопловой щели интенсивное возбуждение колебаний возникает лишь при использовании резонаторов с $\sigma=1,5\text{--}2$ мм. Для узких резонаторов ($\sigma=1$ мм) генерация наблюдалась во всем диапазоне изменения l и h лишь при $K_0=\sigma/\delta=2,5$, причем звуковое давление не превышало 160 дБ; при $K_0=1,2\text{--}1,67$ генерация оказалась весьма неустойчивой, хотя при некоторых значениях параметров настройки ($l=1,75\text{--}2,75$ мм, $h=2\text{--}3,5$ мм) звуковое давление возрастало до 170 дБ. У резонаторов с $\sigma=2,5$ мм уровень звука тоже редко превосходил 160 дБ, к тому же генерация наблюдалась в сравнительно узком диапазоне значений l ($l>3,5$ мм).

На фиг. 2 приведены амплитудные (кривые 1–3) и частотные (кривые 4–6) характеристики излучателя с $\delta=0,8$ и $\delta=2$ мм в зависимости от изменения расстояния между соплом и резонатором, а на фиг. 3 — аналогичные зависимости для $\delta=0,6$ мм. На графиках кривые 1–4, 2 и 5, 3 и 6 соответственно относятся к значениям глубины резонатора 2; 3 и 3,5 мм. Видно, что наилучшие результаты можно получить при $l=2,75\text{--}4$ мм независимо от величины δ , правда, с ее уменьшением оптимальные значения l немного смещаются в сторону меньших величин. При этом оптимальные глубины резонатора лежат в пределах 2–4 мм, а расстояния между соплом и дном резонатора ($A=l+h$) составляют 6–7,5 мм. Как и в случае стержневых излучателей, наилучшие режимы настройки соответствуют $l\approx h$, однако с уменьшением параметра δ хорошие результаты могут быть достигнуты и при $l>h$, но при сохранении указанных оптимальных значений A .

В процессе изучения работы трубчатого излучателя выявился ряд интересных особенностей, не наблюдавшихся у других разновидностей генератора Гартмана, которые оказалось возможным использовать для повышения эффективности распылительного устройства. К ним в первую очередь относится наличие у излучателя определенных частот, на которых возбуждение колебаний оказывается наиболее интенсивным. Для исследованного излучателя такие частоты лежат вблизи 16 и 20 кГц (в зави-

симости от ширины сопловой щели они могут меняться в пределах $\pm 0,5$ кГц). Вторая особенность (как выяснилось, являющаяся следствием первой) состоит в несовпадении оптимальных режимов настройки у геометрически подобных излучателей с разными значениями δ . Так в трубчатом излучателе при пропорциональном изменении всех основных размеров системы сопло — резонатор (но при неизменном диаметре сопловой трубы), хотя зависимость между длиной излучаемой волны λ и δ сохраняется такой же, как и у стержневых излучателей, однако максимальная генерация, наблюдающаяся при одном значении δ , не сохраняется у излучателя



Фиг. 2. Зависимости звукового давления (1-3) и частоты генерации (4-6) трубчатого излучателя при $\delta=0,8$ и $\sigma=2$ мм. Графики 1 и 4 соответствуют $h=2$ мм, 2 и 5 — 3 мм, 3 и 6 — 3,5 мм

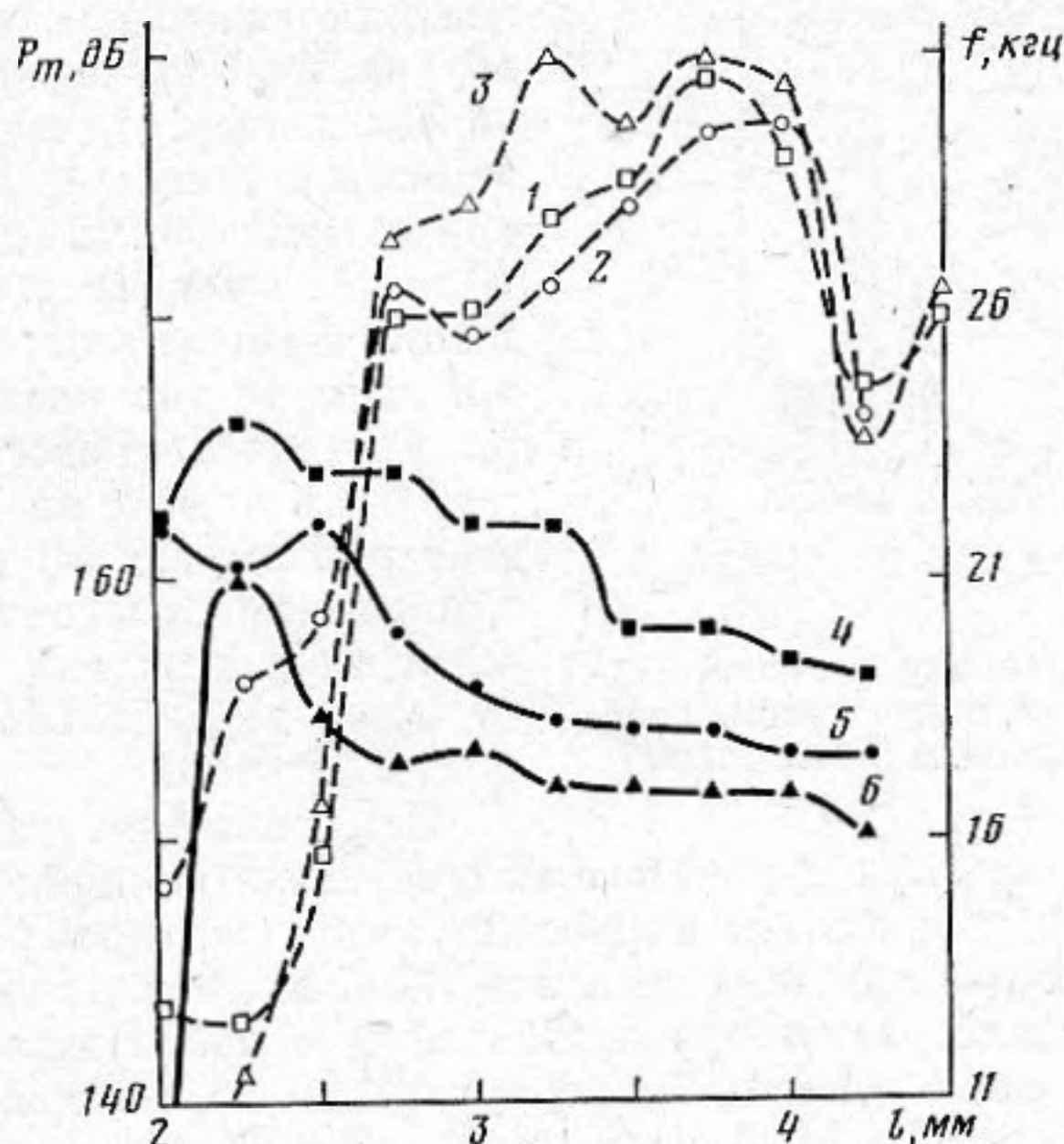
с другой величиной δ . Изменение частоты влечет за собой также и изменение режима генерации. Кроме того, если в известных излучателях удаление резонатора от сопла или снижение перепада давлений приводит к уменьшению частоты генерации, то у трубчатых излучателей в области оптимальных режимов работы изменение параметра l или избыточного давления практически не влияет на частоту. Так, например, у излучателя с $\delta=0,6$, $\sigma=2$, $h=2,5$ мм и $l=3,5$ мм снижение давления воздуха с $P_0=12$ до 5 кгс/см² (проводившееся с интервалом в 1 кгс/см²) привело к уменьшению частоты всего на 1% (с 19,9 до 19,6 кГц) при сохранении уровня звукового давления в пределах 174 ± 1 дБ. Но уже при $P_0=4$ кгс/см², когда частота упала до 19,0 кГц, уровень звука снизился на 6 дБ.

Такое явление «захвата» частоты указывает на присутствие в системе дополнительного резонанса, не связанного с эффектом Гартмана и слабо зависящего как от ширины исходной кольцевой струи, так и от перепада давлений. Вследствие того что газоструйные излучатели представляют собой источники с малым внутренним сопротивлением, внешнее воздействие весьма сильно влияет на режим генерации. Поэтому существование в излучателе вторичного резонатора с фиксированными собственными частотами может осуществлять в некоторых пределах перестройку частоты гартмановского излучателя и создать усиление колебаний (достигающее 4-7 дБ). По-видимому, таким дополнительным резонатором в трубчатом излучателе служит проходная камера (см. фиг. 1), образованная внутренней частью корпуса основного резонатора. Усиление колебаний имеет

место в случае возбуждения излучателя Гартмана на частоте, близкой к одной из собственных частот цилиндрического волновода [5]. Частоты поперечных резонансов могут быть вычислены по формуле

$$f_{m, n} = \alpha_{m, n} c_0 / \pi d_n,$$

где c_0 — скорость звука в среде, заполняющей волновод с диаметром d_n , а $\alpha_{m, n}$ — корни уравнения $J'(\alpha_{m, n}) = 0$ (J — функция Бесселя) для различных мод колебаний. Так как для оптимальных частот на окружности камеры ($d_n = 20$ мм) укладывалось от 2,8 до 3,5 длин волн, можно полагать, что в рассматриваемом волноводе должны возбуждаться вторая или третья несимметричные моды, для которых $\alpha_{20} = 3,05$ и $\alpha_{30} = 4,2$. При этом собственные частоты оказываются равными $f_{20} = 16,5$ и $f_{30} = 22$ кГц, которые



Фиг. 3. Те же зависимости, что и на фиг. 2, но при $\delta = 0,6$ мм

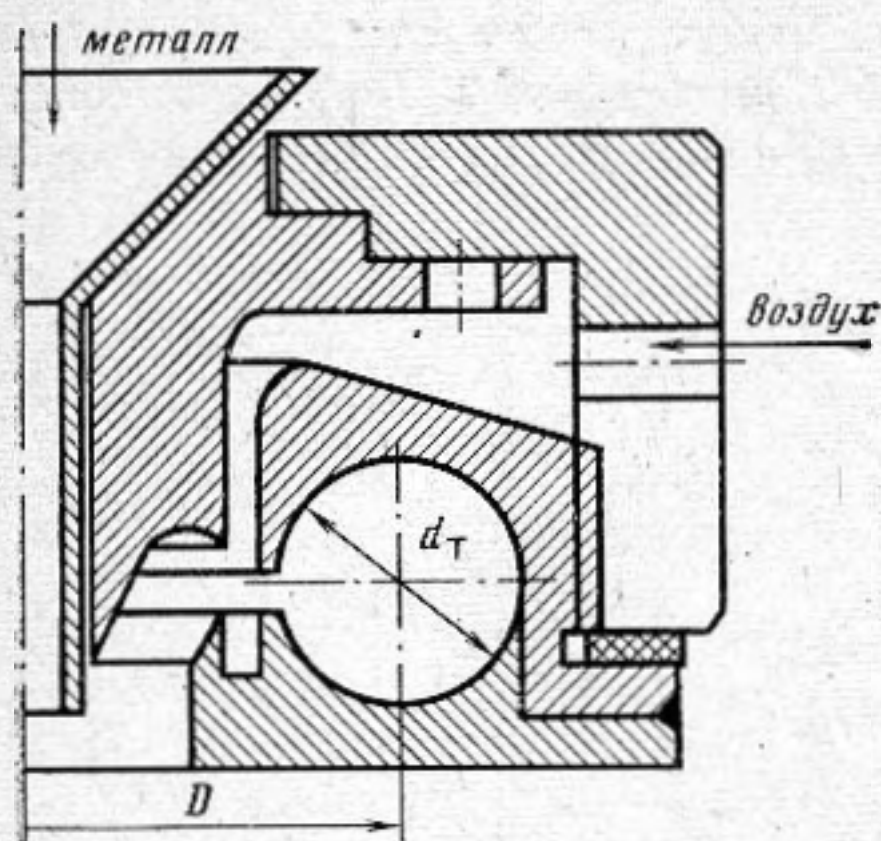
весьма близко совпадают с полученными значениями. Некоторое различие расчетных и экспериментальных частот можно отнести за счет присутствия в центре волновода основания сопла металлопровода. Предположение о влиянии проходной камеры подтверждается также тем, что фотографии звукового поля, показывающие положение волновых фронтов в диаметральной плоскости, дают для первой оптимальной частоты синфазное излучение, а для второй — противофазное. Если учесть, что при f_{20} количество узлов диаметров четное (2), а при f_{30} — нечетное (3), ясно, что в первом случае должны наблюдаться колебания с одинаковой фазой на противоположных концах диаметра, а во втором — со сдвинутой на 180° .

Присутствие проходного резонатора в практическом отношении не всегда желательно из-за возможного налипания расплавленного металла на стенки такого волновода. Поэтому наряду с рассмотренным вариантом был опробован другой тип дополнительного резонатора. Использовалась тороидальная камера, располагавшаяся снаружи от основного резонатора и сочленявшаяся с пространством между соплом и резонатором узкой кольцевой щелью (фиг. 4). Подобные тороидальные резонаторы применялись в 50-х годах и обобщенных свистках, работающих при дозвуковом истечении газа [6] и в качестве согласующих устройств в свистках Лева-вассера. При внешнем расположении тороида относительно основного

резонатора его собственная частота может быть вычислена по формуле для длины волны, нормированной к диаметру сечения камеры d_T :

$$\lambda/d_T = A_0 (D/(D-d_T))^{0,5},$$

где D — средний диаметр тороида, а A_0 — числовой коэффициент, зависящий от скорости истечения газа. Для системы, работающей при сверхзвуковых скоростях, коэффициент A_0 , рекомендованный в [6], оказался непригодным. Его величина для перепадов давлений $P_0/P_\infty = 5-8$ при изменении d_T в пределах от 11 до 19 мм составила $A_0 = 1,1-1,2$. Исследования резонансных характеристик трубчатого излучателя с добавочным тороидальным резонатором, проведенные в широком диапазоне изменения избыточных давлений $P_0 = 4-10$ кгс/см², показали, что при приближении частоты генерации к собственной частоте тороидального резонатора уровень звукового давления может быть поднят на 3-4 дБ. То, что этот эффект связан непосредственно с наличием добавочного резонатора, было подтверждено опытами с заглушкой тороидальной камеры резиновым жгутом.



Фиг. 4. Схема пневмоакустической форсунки с трубчатым излучателем, снабженным тороидальным резонатором

На основании данных, полученных при исследованиях трубчатого излучателя и влияния добавочных резонаторов, было разработано несколько вариантов промышленного пневмоакустического распылителя металлов (ПАРМ), отличающихся конструкцией тороидального резонатора и рабочей частотой. Например, ПАРМ-16, имеющий следующие основные конструктивные параметры: диаметр сопла $d_c = 28$ мм, $\delta = 1$ мм, $K_\delta = 2,3$, $l = h = 4$ мм, $D = 46$ мм, $d_T = 16$ мм, создает уровень звукового давления в зоне выхода жидкого металла, равный 174-175 дБ.

Проверка работы пневмоакустических распылителей была проведена на лабораторной установке с применением легкоплавких материалов (олово, висмут, свинец, цинк). Сравнение дисперсности полученных порошков (определявшейся методом ситового анализа) показало, что пневмоакустические распылители позволяют увеличить дисперсность и делают материал более однородным по гранулометрическому составу. Кроме того, при использовании разработанных устройств расход сжатого воздуха может быть снижен на 20%.

Эксперименты по распылению быстрорежущей стали марок 10P6M5 и P10K8Ф1M6 были проведены на опытно-промышленной установке с применением ПАРМ-15,16 и др. Опыты показали, что пневмоакустический метод распыления позволяет получить выход годного продукта в пределах 87-94% при выходе мелкодисперсной фракции (менее 50 мкм) 21-26%, тогда как при распылении пневматической форсункой эти показатели составляют соответственно 76-80 и 16%. При этом среднемедианный размер частиц со 100-140 мкм у пневматической форсунки снизился до 80-100 мкм для пневмоакустической. Таким образом, разработанные распылители, обладая большей экономичностью (расход азота снизился на 0,13 нм³/кг), позволяют повысить выход годного материала в среднем на 10-15%, что делает их перспективными для использования в устройствах порошковой металлургии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грант Н. Дж. Специальные методы распыления порошков.— В кн.: Порошковая металлургия материалов специального назначения. М.: Металлургия, 1977, с. 79.
2. Einrichtung zum Vorspruhen von Flüssigkeiten insbesondere vor flüssigen Brennstoffen. Пат. Австрии № 285791, кл. 24 в. 5, 1970.
3. Борисов Ю. Я. Конструктивные особенности газоструйных излучателей— Акуст. ж., 1980, т. 26, № 1, с. 41—47.
4. Борисов Ю. Я., Подольский С. Л. Длина бочки кольцевой недорасширенной струи, истекающей из звукового сопла, имеющего на оси цилиндрический стержень.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, № 4, с. 167—171.
5. Борисов Ю. Я., Гылкина Н. М., Виноградов С. А., Пыхов Л. С., Федоров Б. И. Исследование акустических характеристик сверхзвуковой струи, вытекающей в цилиндрическую трубу.— В кн.: Акустико-аэродинамические исследования. М.: Наука, 1975, с. 91—97.
6. Gavreau V., Calaora A. Generateurs puissants de son et d'ultrasons a emetteurs couples. Пат. Франции, № 1131551, кл. G01h, 1956.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР
Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
8.X.1980