

УДК 534.232

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕРЖНЕВОГО
ГАЗОСТРУЙНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ГСИ-4*Ю. Я. Борисов, В. Н. Гинин, Н. М. Гынкина*

Разработан газоструйный стержневой излучатель, работающий без выброса воздуха в озвучиваемую среду. Проведено исследование его работы в заглушенной трубе и в открытом пространстве. Найдены две области максимального излучения, которые соответствуют определенным значениям параметра $A = l + h$.

В последние годы разработан ряд газоструйных генераторов, предназначенных для интенсификации некоторых технологических процессов, происходящих в газовой фазе [1—6]. Известно, что подобные излучатели создают в камере озвучивания сильный воздушный поток, отрицательно влияющий на технологический процесс из-за изменения температуры, разбавления среды и других факторов. Применяемые в настоящее время пластмассовые мембраны для отделения воздуха или отсасывающие устройства [5] мало перспективны из-за больших потерь энергии и снижения к.п.д. установки.

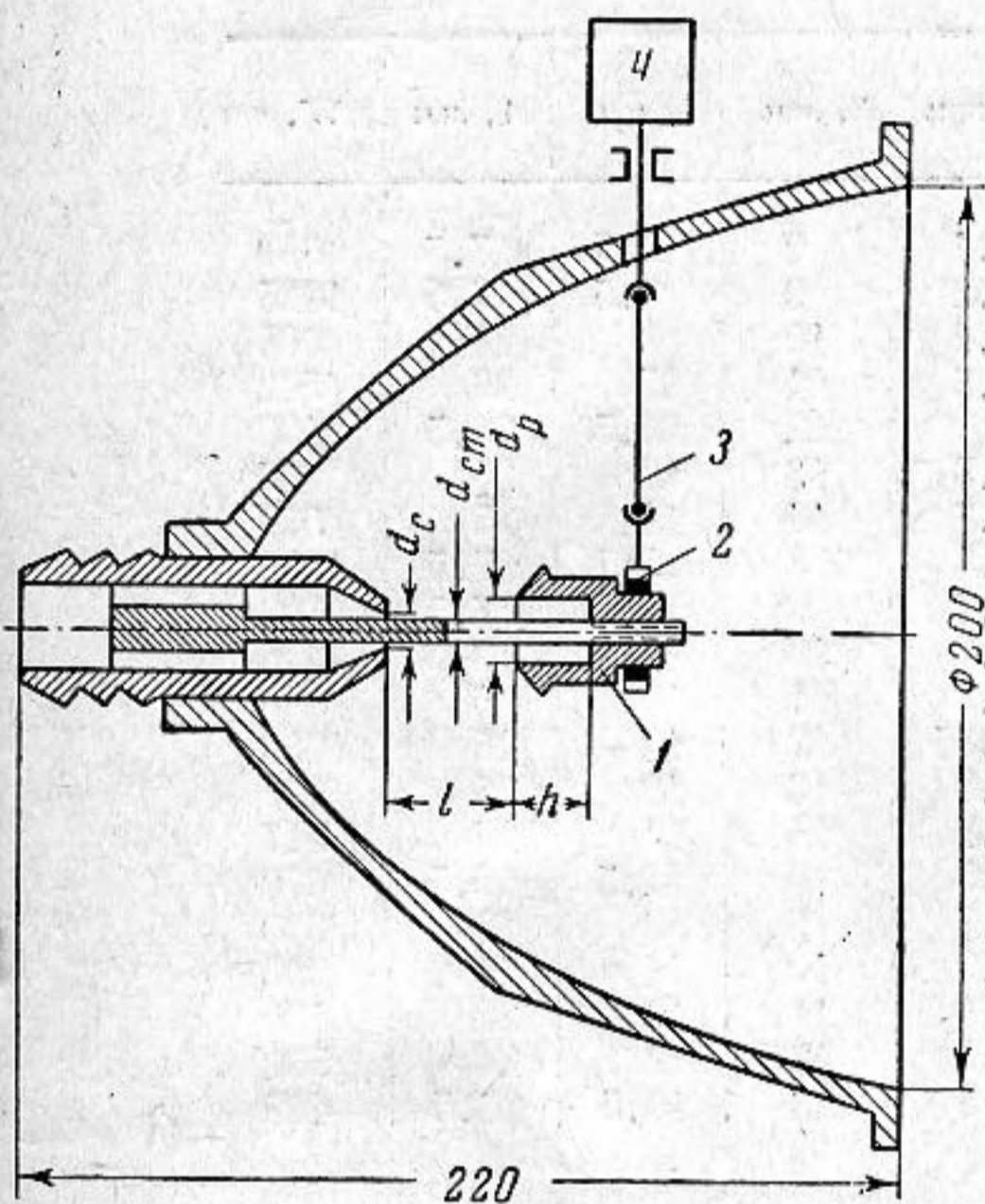
В 1962—1963 гг. нами были проведены исследования, направленные на создание мощного акустического газоструйного излучателя промышленного типа, работающего без выброса воздуха в озвучиваемую среду. За основу был взят стержневой вариант генератора Гартмана, обладающий рядом конструктивных преимуществ и сравнительно высокой экономичностью [1—3]. В процессе работы было создано несколько моделей (ГСИ-2, ГСИ-3, ГСИ-4), отличающихся, в основном, типом рефлектора, параметрами настройки и методом отвода воздуха (о чем будет сказано ниже). Так как основные габариты и конструкция излучающей системы (сопла и резонатора) для всех моделей оставались приблизительно одинаковыми, акустические характеристики этих моделей мало отличаются друг от друга. Поэтому остановимся лишь на результатах исследований ГСИ-4, у которого воздух после выхода из сопла полностью удаляется через отверстия в рефлекторе.

Исследования генератора проводились путем определения частоты и выходной мощности излучения в зависимости от настройки, т. е. именно эти два параметра наиболее полно характеризуют работу газоструйных излучателей. Кроме того, для выяснения механизма генерации звука и определения некоторых газодинамических характеристик излучателя были изучены распределения статического и полного давления воздуха в струе.

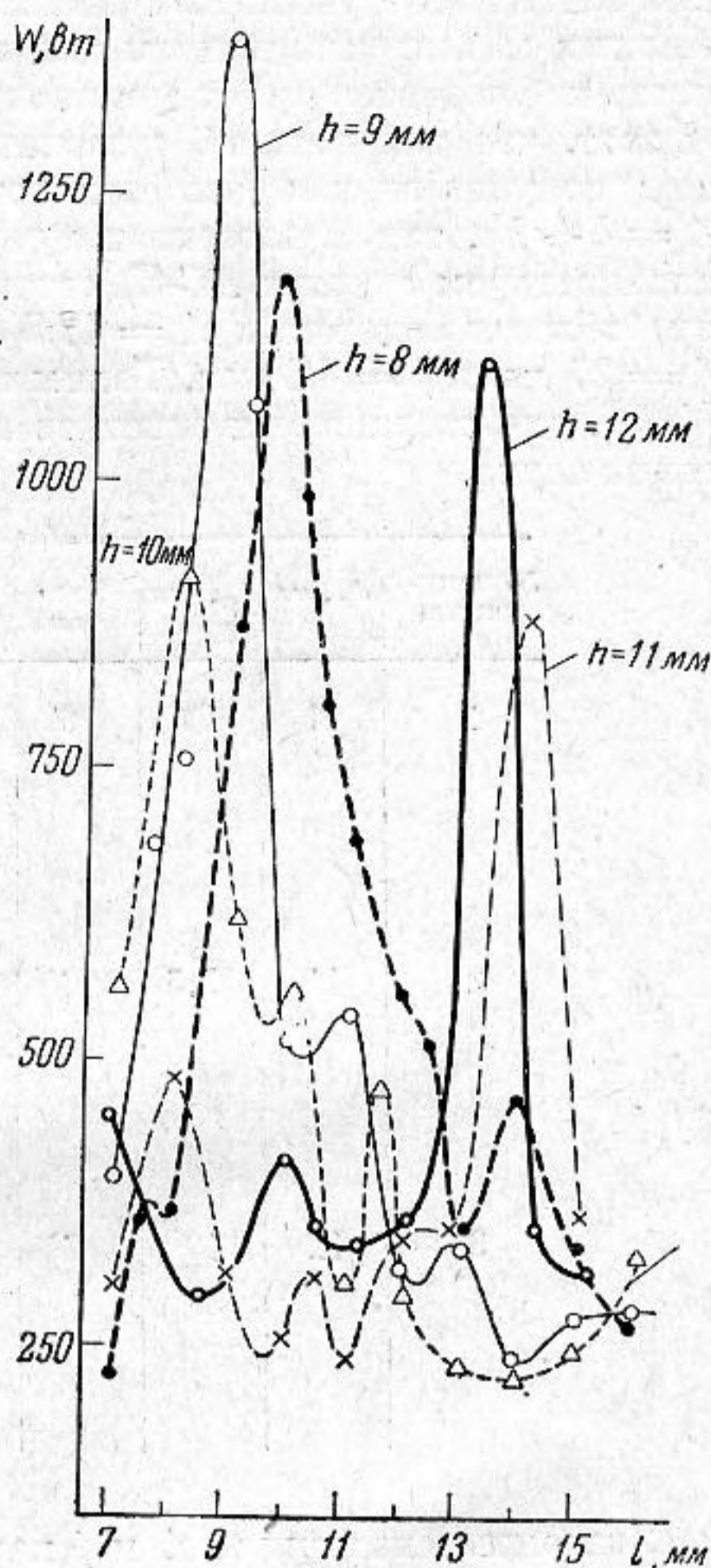
Определение акустической мощности излучателя производилось двумя методами. Основные результаты были получены при измерениях в «бесконечной трубе», представлявшей собой полутораметровый полый цилиндр с поглотителем на конце, обеспечивающим создание режима бегущей волны. В такой акустической волновод помещался датчик из титаната бария, который с помощью механического устройства и электропривода совершал движение по спирали в плоскости поперечного сечения трубы. Шаг спирали приблизительно равнялся диаметру используемого микрофона. Сигнал с датчика записывался на ленте регистратора уровня Н-110, после чего записи обрабатывались с целью получения величины средней

интенсивности на каждом витке спирали, а затем и общей мощности [7].

Для проверки полученных результатов были проведены дополнительные измерения в открытом пространстве при расположении излучателя на опоре высотой 25 м. В этом случае мощность вычислялась на основании характеристик направленности, снятых на расстояниях 0,5; 1,0 и 1,5 м от излучателя.



Фиг. 1



Фиг. 2

Учитывая, что ошибка при измерении мощности (частично определяемая неточностью обработки записей, составлявшей $\pm 0,5$ дБ) была около $\pm 15\%$, можно было считать, что оба использованные метода дали близкие результаты.

При работе в трубе для ускорения измерений мы использовали систему с дистанционным управлением для перемещения резонатора по отношению к соплу (см. фиг. 1). На хвостовик резонатора 1 надевалось миниатюрное червячное колесо 2, приводимое во вращение с помощью червяка, карданного вала 3 и двигателя с редуктором 4. Таким образом, при настройке излучателя резонатор можно было плавно перемещать по стержню с винтовой резьбой в диапазоне изменения l от 7 до 15 мм. Точность установки l по калиброванной шкале сельсина-приемника составляла $\pm 0,2$ мм. Глубина резонатора h изменялась ручным способом в пределах 8—14 мм через 1 мм. Следует указать, что подобный метод настройки является довольно грубым. Поэтому, хотя нами и были найдены общие закономерности, но, по-видимому, мы не получили максимальных значений мощности, которых можно достигнуть при более тщательной настройке.

На фиг. 2 представлены характерные кривые изменения излучаемой мощности в функции l для излучателя с диаметром $d_c = 11$ мм,

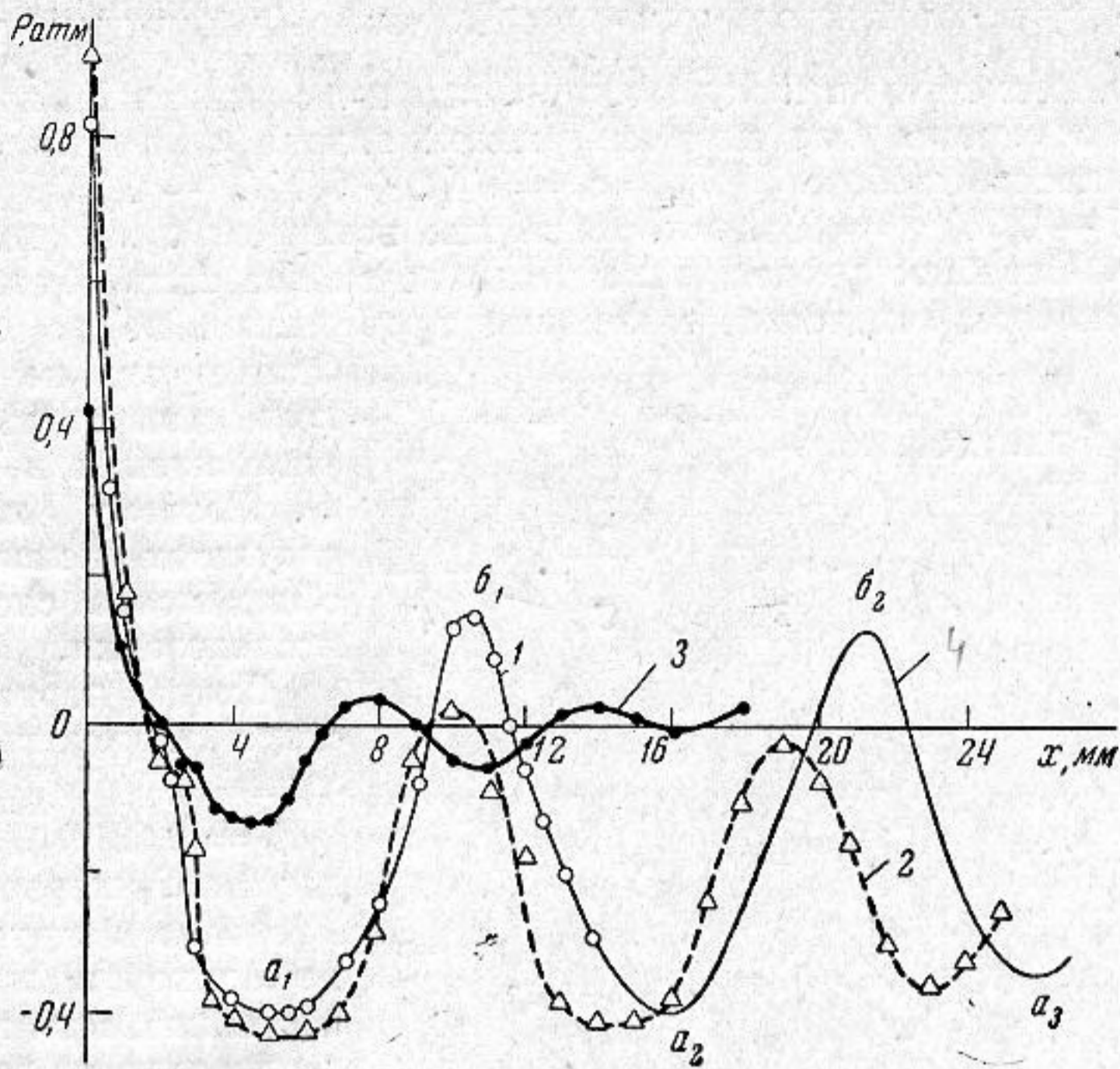
$K = d_p / d_c = 1,6$ и со стержнем $d_{ст} = 6$ мм (при давлении воздуха $P_0 = 3,5$ атм при различных значениях h). Аналогичные графики получены для излучателей с несколько отличными значениями d_c , K и $d_{ст}$. Кривые мощности в указанном диапазоне изменения l имеют два четко выраженных максимума, причем для каждого значения h максимальная мощность наблюдается при своем значении l . Анализ полученных кривых показывает, что для каждой «резонансной» области, отвечающей максимальному излучению, как расстояние от сопла до дна резонатора (т. е. параметр $A = l + h$), так и частота излучения f (в пределах точности измерения анализатором спектра АС-3) остаются постоянными. Для ближней (к соплу) области генерации $A = 17,5$ мм и $f = 6,6$ кГц, а для второй области $A = 25$ мм и $f = 4,8$ кГц. Таким образом, как и для обычных генераторов [4, 6], для стержневых свистков имеют место оптимальные частоты генерации звука.

№ излу- чателя	d_c , мм	d_p , мм	$d_{ст}$, мм	f , кГц	h , мм	l , мм	A , мм	W , Вт
1	11	16	6	6.4	8	9.5	17.5	690
				6.2	9	8.5	17.5	1025
				6.4	10	8	18	605
				4.8	11	15	26	562
				5	12	12.5	24.5	400
				4.8	13	12	25	637
				4.7	14	11	25	550
2	11	17.5	6	6.4	8	9.5	17.5	1180
				6.7	9	8.5	17.5	1390
				6.6	10	8	18	915
				4.9	11	14	25	880
				4.85	12	13	25	1060
				4.8	13	12	25	607
				4.8	14	11	25	517
3	12	19	7	6.5	8	11.5	19.5	870
				6.7	9	10	19	810
				4.9	10	14	24	700
				4.8	11	13	24	450
				4.6	12	12	24	530
				4.5	13	10.5	23.5	485

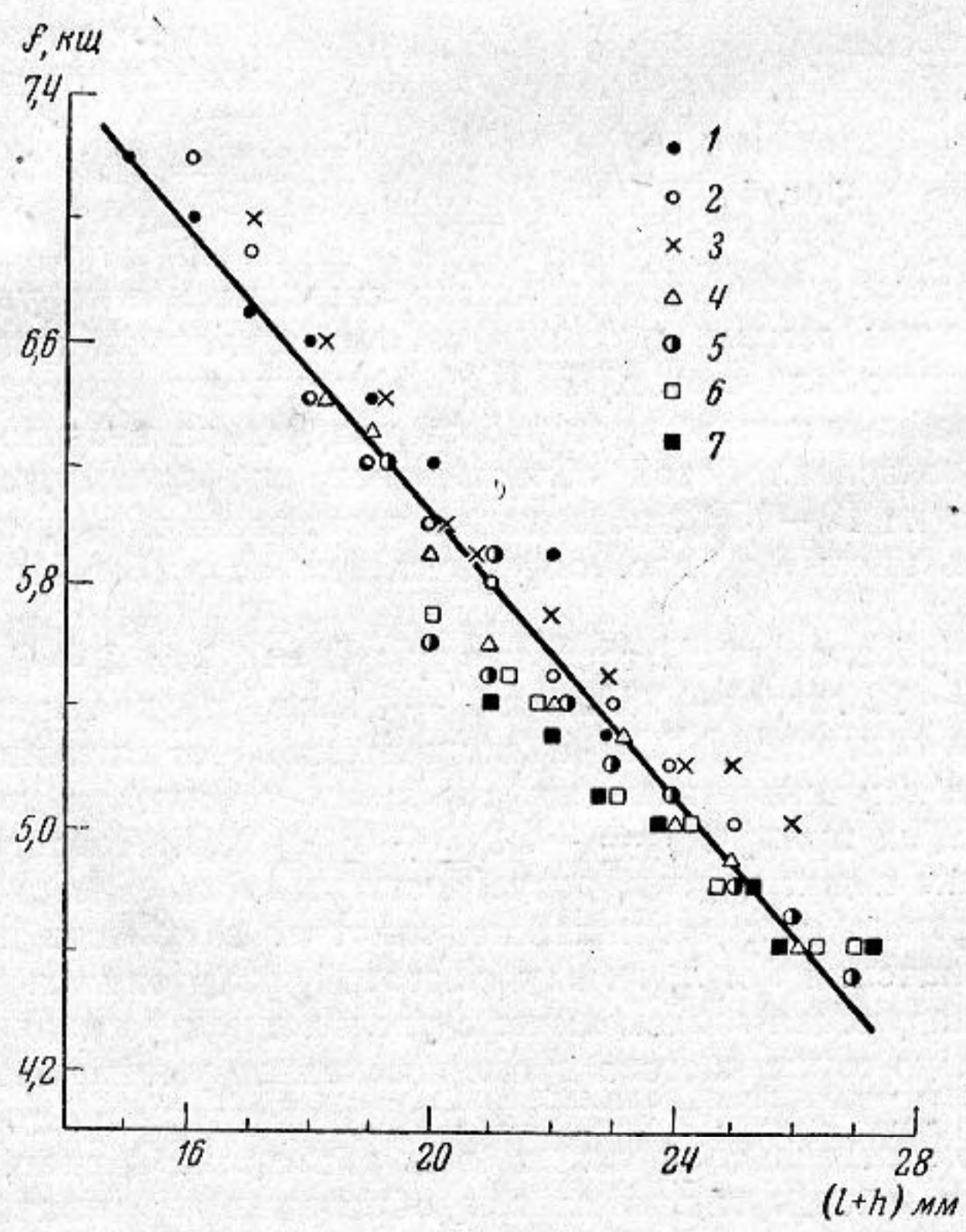
Указанные величины A и f характеризуют излучатель с вполне определенными значениями d_c , $d_{ст}$ и K при работе на определенном давлении. При изменении этих данных оптимальные параметры несколько изменяются (см. таблицу, где приведены значения максимальной мощности для нескольких вариантов излучающей системы при $P_0 = 3,5$ атм).

Рассмотрение фиг. 2 и таблицы показывает, что при малых глубинах резонатора ($h = 8, 9, 10$ мм) эффективная генерация наблюдается в первой «резонансной» области, а при больших глубинах ($h = 11, 12, 13$ и 14 мм) — во второй.

С целью проверки возможности использования формул Гартмана для расчета стержневых излучателей нами было снято распределение давления P в свободной струе (для излучателя 3) фиг. 3. Измерения производились вдоль стержня (координата x отсчитывается от кромки сопла) на расстоянии 5 мм от оси генератора при трех значениях давления воздуха P_0 . Для кривых 1, 2 и 3 P_0 равно соответственно 3,5; 2,8 и 1,6 атм. Давление в струе измерялось с помощью статического насадка диаметром 1 мм и образцового манометра. Из фиг. 3 видно, что начало (a_1) первой зоны неустойчивости, т. е. области ($a_1 b_1$), где давление начинает повышаться для $P_0 = 3,5$ атм (кривая 1) лежит на расстоянии 5,5 мм от среза сопла. Гартман [8] рекомендовал располагать резонатор в последней трети этой зоны, т. е. в нашем случае на расстояниях, начиная примерно с 7 мм. Фиг. 2 показывает, что именно, начиная с $l = 7$ мм,



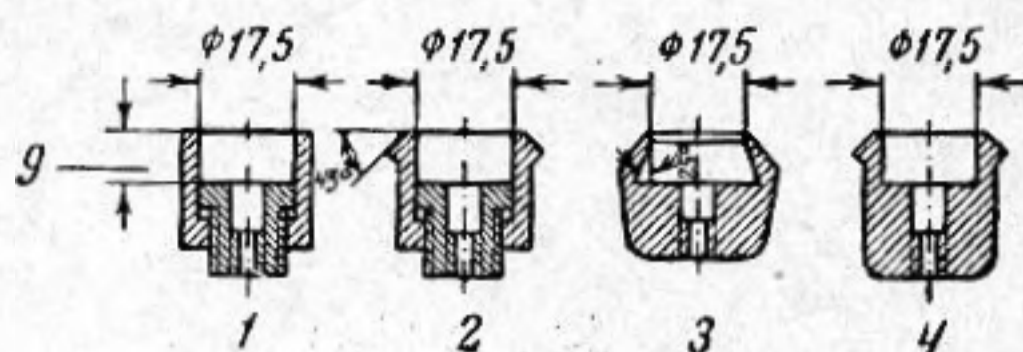
Фиг. 3



Фиг. 4

была получена устойчивая генерация звука при большой излучаемой мощности.

Однако, несмотря на кажущееся совпадение с данными Гартмана, для стержневого свистка был получен режим, сильно отличный от расчетного. Согласно работе [8], $a_1 = d_c [1 + 0,04(P - 0,93)^2] = 11[1 + 0,04(3,5 - 0,93)^2] = 13,9$ мм, тогда как измеренная величина a_1 равна 5,5 мм. Подобное расхождение частично может быть объяснено тем, что в стержневом излучателе измерения проводились не по оси струи.



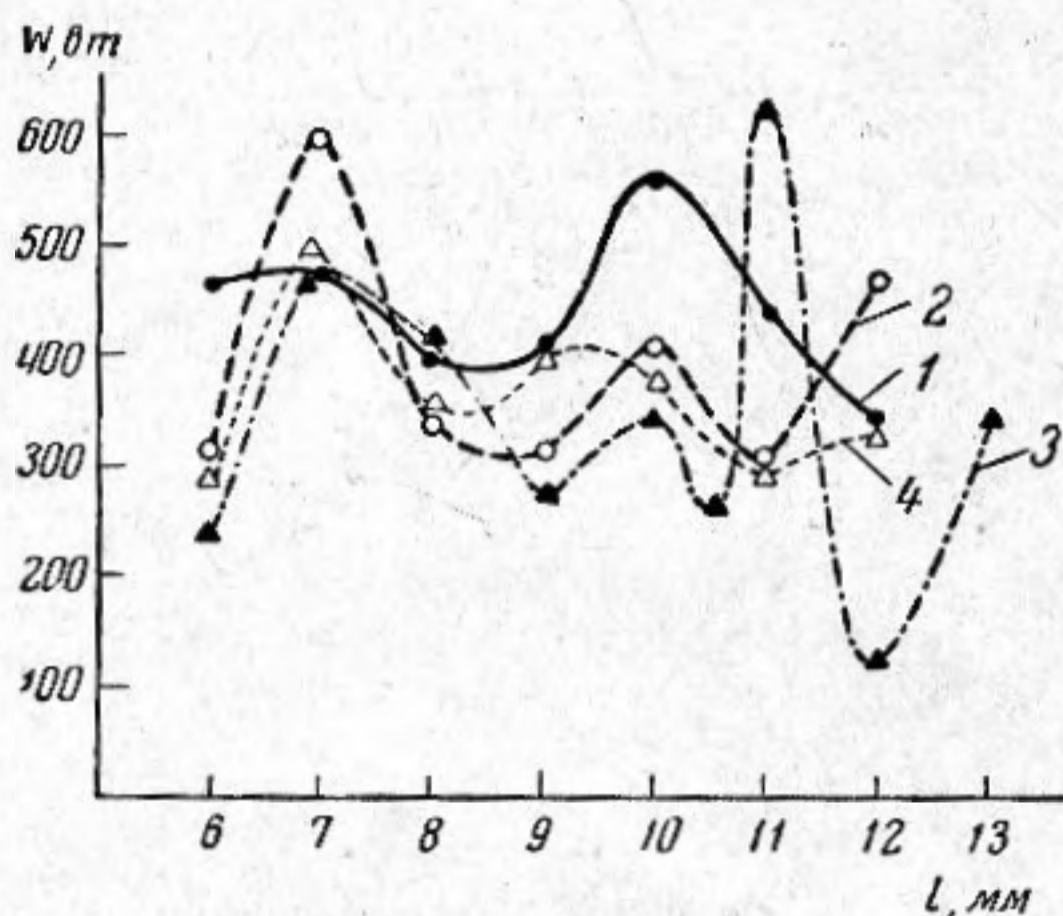
Однако это не объясняет полностью столь большого расхождения в величинах a_1 . Поэтому полученный результат показывает необходимость специального исследования.

Длина первой ячейки струи определяется формулой

$$\Delta = 1,12 d_c \sqrt{P_0 - 0,9},$$

где Δ и d_c выражены в мм. Введение в струю стержня не только приближает зону неустойчивости к соплу, но и укорачивает всю ячейку. Измерения со стержнями различной толщины показали, что длина ячейки для кольцеобразной струи зависит от диаметра стержня:

$$\Delta = (1,1 d_c - 0,08 d_{ст}^2 - 0,15 d_{ст}) \sqrt{P_0 - 0,9}.$$



Фиг. 5

Таким образом, увеличивая диаметр стержня можно уменьшить длину ячейки и, тем самым, сместить рабочий диапазон излучателя в область более высоких частот. В ГСИ-4 применен стержень диаметром 6 мм, а настройка соответствует работе излучателя в первой резонансной области. Использование этой области дает ряд преимуществ (увеличение мощности на 10—15%, повышение частоты на 13%), причем на наиболее существенном факторе, определившем ее выбор, мы остановимся ниже.

На фиг. 4 (обозначение 1 соответствует $h = 8$ мм, 2 — 9 мм, 3 — 10 мм, 4 — 11 мм, 5 — 12 мм, 6 — 13 мм и 7 — 14 мм) приведен график зависимости частоты генератора ГСИ-4 (излучатель 2) от параметра A . Значения частоты в кГц при различных глубинах резонатора ложатся с точностью $\pm 10\%$ на прямую $f = -0,2(l + h) + 10,6$. Аналогичные зависимости получены и для других, исследованных нами свистков.

Таким образом, для стержневого свистка, в области исследованных при опытах значений l и h , между частотой излучения и параметром A существует следующая зависимость: с увеличением расстояния от доннышка резонатора до сопла частота пропорционально уменьшается. Практически генератор ГСИ-4 может излучать любые частоты от 7 до 4 кГц, причем возможно, что этот диапазон может быть расширен. Однако, мощность излучения имеет максимум при вполне определенных величинах параметра A , по-видимому, определяющего резонансные свойства системы резонатор — струя.

Следует указать, что ввиду тесной связи между акустическими параметрами излучателя и его газодинамическими характеристиками, изуче-

ние структуры струи должно явиться одним из основных этапов работы при конструировании новых типов генераторов. По нашему мнению, особый интерес представляет изучение характеристик струи непосредственно на работающем излучателе, так как при введении резонатора струя сильно меняет свои параметры.

Здесь следует указать, что хотя при определенных настройках ГСИ-4 ($A = 17,5$ и 25 мм) удается получить излучаемую мощность больше 1 квт, но при работе генератора в промышленных условиях, по-видимому, нельзя гарантировать эту максимальную мощность, полученную в режиме излучения в свободное пространство. Малое внутреннее сопротивление газоструйного генератора делает настройку весьма критичной по отношению к изменению давления сжатого воздуха, наличию отражающих поверхностей и т. д. Поэтому в качестве расчетной следует брать среднее значение мощности ($400-600$ вт), которую отдает генератор в сравнительно широкой области измерений P_0 и A .

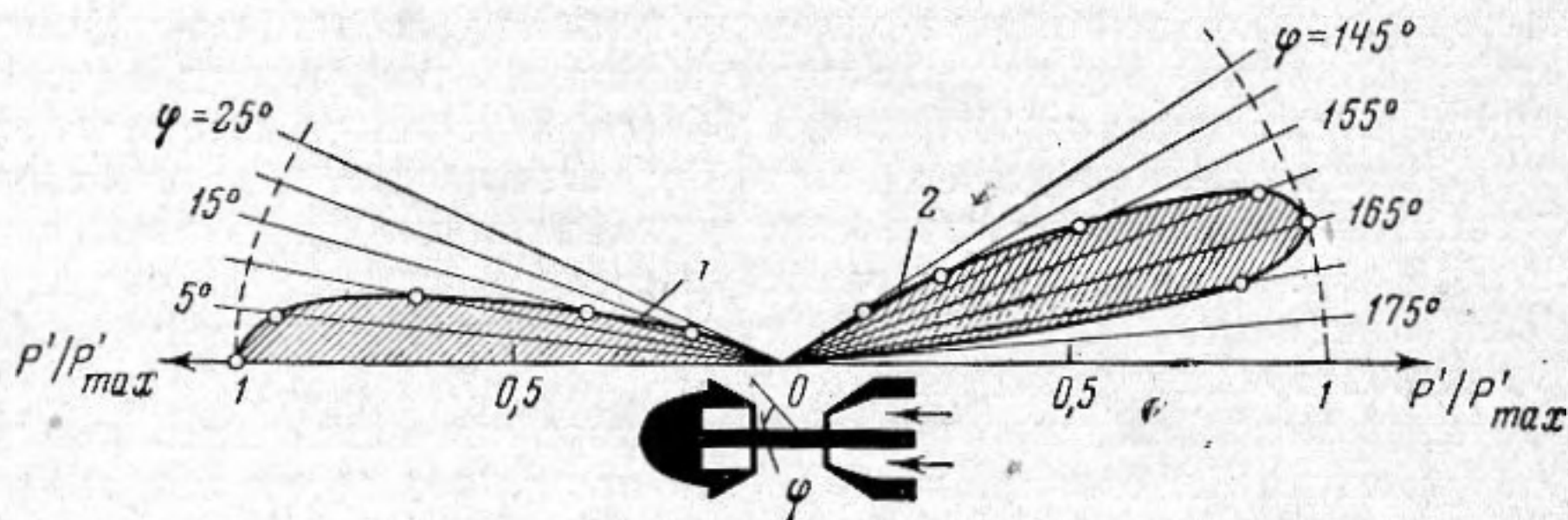
Одним из важнейших параметров генератора является отношение диаметров резонатора и сопла $K = d_p / d_c$. В настоящее время нет теоретического обоснования необходимости увеличения K выше $1,3$, тогда как некоторые авторы считают оптимальными величинами $K = 1,66$ [4] и даже $2,5$ [3]. Не имея возможности подробно исследовать этот вопрос, мы взяли за основу работу [4], так как в ней приведены закономерности излучения, полученные при определении общей мощности генератора, а не звукового давления в какой-либо точке поля. Последний метод еще широко распространен, но не может дать правильных результатов, особенно при сложной структуре акустического поля. Для проверки рекомендации Р. И. Школьниковой для стержневого генератора, были испытаны резонаторы с d_p , равным $16; 17,5$ и 19 мм (K равно $1,45; 1,6$ и $1,72$ — соответственно); однако нами не было получено четкой зависимости мощности от величины K . Как видно из таблицы, для стержневого излучателя при соответствующей настройке можно получить значительные мощности с любым из исследованных резонаторов, хотя можно отметить некоторое увеличение отдачи при $K = 1,6$. Проведенные эксперименты не могут считаться вполне достаточными для окончательных выводов, однако, по-видимому, величина K определенным образом связана с газодинамическими и акустическими характеристиками и поэтому ее нельзя выбирать в отрыве от других параметров излучателя таких, например, как h и l , а так же от P_0 .

В настоящее время нет ясного представления о том, как влияет форма резонансной полости и вид кромки резонатора на процесс излучения (ср. [4 и 8]). На фиг. 5 приведены чертежи исследованных нами резонаторов и соответственные графики мощности, снятые для фиксированных значений l при $P_0 = 3$ ати. Резонаторы 1 и 2 отличались формой наружного края и имели подвижное донышко. Резонаторы 3 и 4 были цельноточечные, но отличались формой резонансной полости и наружной поверхности. Результаты испытаний показали, что характер излучения генератора для резонаторов 1, 2 и 4 примерно одинаков, кривые мощности W отличаются только по абсолютной величине, что можно объяснить неточностью настройки и обработки результатов измерения. Следовательно, форма наружного края резонатора для стержневого генератора не играет существенной роли, что подтверждает выводы Школьниковой [4].

Полученные в [8] отрицательные результаты для резонатора с плоской наружной кромкой, по-видимому, объясняются малой величиной коэффициента K . В струе, диаметр которой превышает диаметр входного отверстия резонатора, наличие широкой кромки затрудняет процесс обтекания резонатора и ухудшает режим излучения. В нашем случае, при $K = 1,6$, струя полностью входит в резонатор и форма наружной кромки не оказывает влияния на работу излучателя.

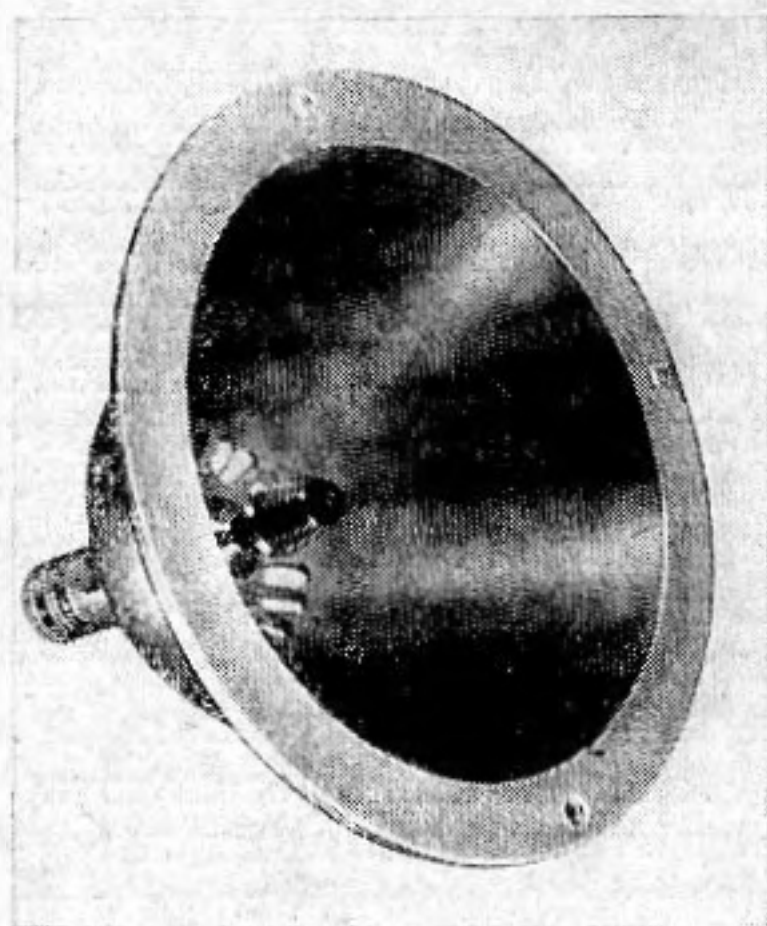
Форма же резонансной полости существенно изменяет характеристику. Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

При разработке ГСИ-2 и ГСИ-3 мы воспользовались тем обстоятельством, что, как это было отмечено в работе [6], при некоторых настройках (в нашем случае при $A = 25$ мм) воздух из сопла обтекает резонатор узкой конической струей и его можно вывести через отводное устройство. (На фиг. 6 этот режим работы представлен кривой 1, показывающей угловое распределение давления скоростного напора, струи P , измеренного



Фиг. 6

трубкой Пито.) Поэтому в указанных моделях за резонатором располагался воздухоотборник, укрепленный в рефлекторе на двух трубках, через которые воздух выбрасывался в атмосферу. Хотя это в какой-то мере и решало



Фиг. 7

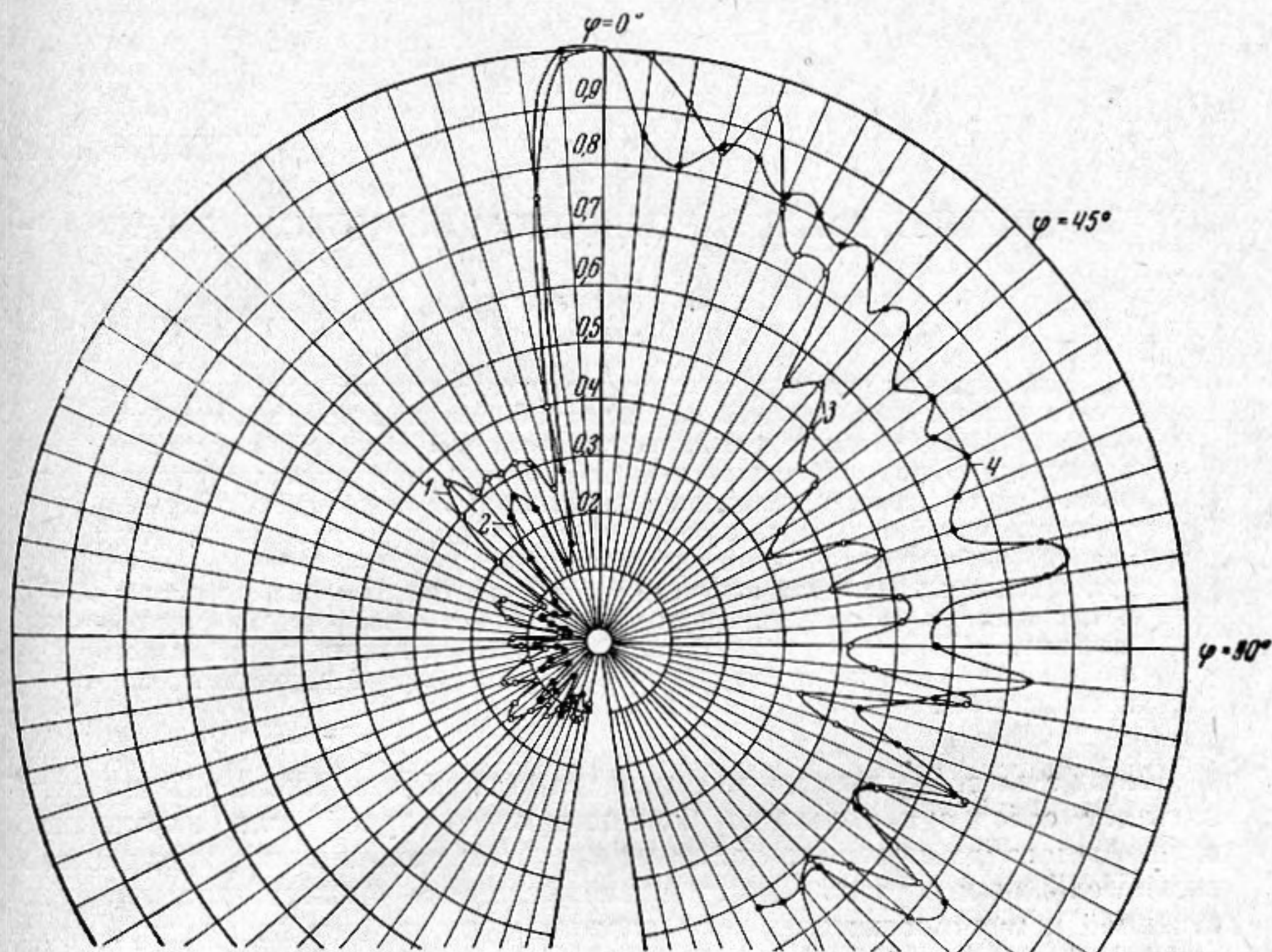
проблему удаления воздуха, но подобную конструкцию нельзя считать удачной, т. к. воздухоотборник расположен в направлении максимального излучения, и потери звуковой энергии могут оказаться значительными. Совершенно иной характер имеет поток воздуха при работе в первой области генерации ($A = 17,5$ мм). Воздух, выходящий из сопла, резко меняет свое направление и обтекает узкой конической струей сопло (кривая 2). Это явление, по-видимому, объясняется отражением струи от близко расположенного резонатора. Таким образом, при работе в первой области генерации можно легко удалить воздух из рефлектора, достаточно лишь сделать в последнем пазы, равные ширине струи. На фиг. 7 показан внешний вид ГСИ-4, в котором применен указанный метод отвода воздуха.

На фиг. 8 представлены характеристики направленности ГСИ-4 $\Phi(\varphi) = p_\varphi / p_0$ (p_0 — звуковое давление по оси генератора, p_φ — по направлению, составляющему угол φ с осью), снятые при работе в открытом пространстве, на расстоянии 50 и 100 см от области генерации. Кривые 1 ($R = 100$ см) и 2 ($R = 50$ см) дают представление о пространственном распределении звукового давления при работе излучателя с рефлектором, а кривые 3 и 4 ($R = 100$ и 50 см соответственно) — при работе без рефлектора.

Если учесть, что ГСИ-4 без рефлектора излучает почти сферическую волну то, очевидно, что потери энергии через пазы в рефлекторе будут не очень существенными. Измерения в свободном пространстве показали, что доля энергии за рефлектором составляет менее 15% от общей излучаемой энергии, что существенно меньше тех потерь, которые наблюдаются, например, при использовании разделительных мембран. Кроме того, конст-

рукция ГСИ-4 позволяет при необходимости в некоторых пределах изменять количество отводимого воздуха, путем перемещения излучателя относительно рефлектора на 2—3 мм; это не влияет на излучаемую мощность, но приводит к задержке части выходящего воздуха, не попадающей таким образом в пазы.

В заключение следует отметить, что излучатель ГСИ-4 в промышлен-



Фиг. 8

ных условиях показал результаты близкие к полученным при лабораторных опытах. Разница в мощностях различных экземпляров излучателей не превышала 20%. Расход воздуха составляет 2,8—2,9 м³/мин при $P_0 = 3,5$ атм. Максимальный к.п.д. лежит в пределах 20—24%, а средний (соответствующий широкому диапазону изменений P_0 и A) равен 8—10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. E. Savory. Experiments with the Hartmann acoustic generator. *Engineering*, 1950, 170, 4410, 99—100, 136—138.
2. J. Hartmann, E. Trudsø. Synchronisation of air — jet generators with an appendix on the stem generator. *Dan. Mat. Fys. Medd.*, 1951, 26, 10, 2—39.
3. M. L. Landais. Research on the stem — jet acoustic whistle. *Ultrasonic News*, 1961, 4, 4, 7—9.
4. Р. И. Школьников. Воздухоструйные генераторы акустических колебаний для коагуляции аэрозолей. *Акуст. ж.*, 1963, 9, 3, 368—375.
5. В. П. Куркин. К вопросу о генерации звука газоструйной сиреной. *Акуст. ж.*, 1961, 7, 4, 442—445.
6. М. Л. Варламов, Г. А. Манакин, А. Н. Господинов. Исследование усовершенствованного газоструйного генератора звука повышенной мощности. *Научн. записки ОПИ, Одесса*, 1962, 37, 31—40.
7. Ю. Я. Борисов. Методы исследования акустических параметров газоструйных генераторов. *Ультразвук. техника*, 1964, 1, 1—9.
8. J. Hartmann. The acoustic air — jet generator. *Ingeniørvidenskabelige skrifter* 1939, 4, 2—203.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
17 апреля 1964 г.