

УДК 534.231:532.542

© 1992 г. Ю.В. Фирсов

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ТРАКТЕ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМ СБРОСОМ ИЛИ ВДУВОМ ЧАСТИ РАСХОДА

В экспериментальном плане исследовались особенности динамики газового потока в прямолинейном канале с сосредоточенным вдувом или сбросом части расхода газа через боковую поверхность. Проведено сопоставление результатов расчетов, выполненных по разработанной методике, с данными экспериментов.

Вопросам распространения малых акустических возмущений в трактах с переменными по длине свойствами посвящено множество работ. Например, в [1] рассмотрена задача определения амплитудно-частотной характеристики газового потока в канале с периодически изменяющейся площадью поперечного сечения. В работе [2] исследуются особенности динамики потока двухфазной газожидкостной среды в прямолинейном трубопроводе, связанные с пространственной периодичностью ее свойств, обусловленной волнами концентрации свободной газовой фазы. Акустические характеристики газового потока в тракте с поворотом под углом 90° рассмотрены в [3]. Основным результатом всех этих работ является вывод о возможности целенаправленного изменения акустических свойств потока за счет подходящей трансформации его стационарных характеристик по длине канала. При этом изменение акустических свойств, если оставаться в рамках одномерного течения, происходит по двум основным причинам. Во-первых, становится переменным по длине волновое сопротивление ρC [4] (ρ — плотность, C — скорость звука в среде), что в конечном счете приводит к перераспределению кинетической и потенциальной энергии в акустической волне. Другим фактором являются возможные потери полного давления в местах изменения стационарных характеристик потока. Одним из возможных способов изменения стационарных характеристик потока в канале, при котором на акустические свойства влияют оба эти фактора, является сосредоточенный вдув или сброс части расхода через боковую поверхность. Изменения акустических свойств потока с учетом энтропийных волн и распределенности сброса всего расхода газа рассматривались в работах [4, 5]. В [4] теоретически исследовались акустические свойства коллектора, входящего в состав проточной части газогенератора, отвод газа из которого через сопловой аппарат турбины можно считать равномерно распределенным по длине. В работе [5] предложена линейная модель, описывающая пульсирующий поток газа с волнами энтропии при сосредоточенном в ряде сечений тракта отводе газа, причем в области низких частот проведено сопоставление расчетов с экспериментальными данными.

Настоящая работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию акустических частотных характеристик потока газа в тракте с сосредоточенным сбросом или вдувом части расхода через боковую поверхность в диапазоне частот $20 \pm \pm 350$ Гц, что при данных геометрии тракта и параметрах газа соответствует охватыванию по частоте первых трех резонансов.

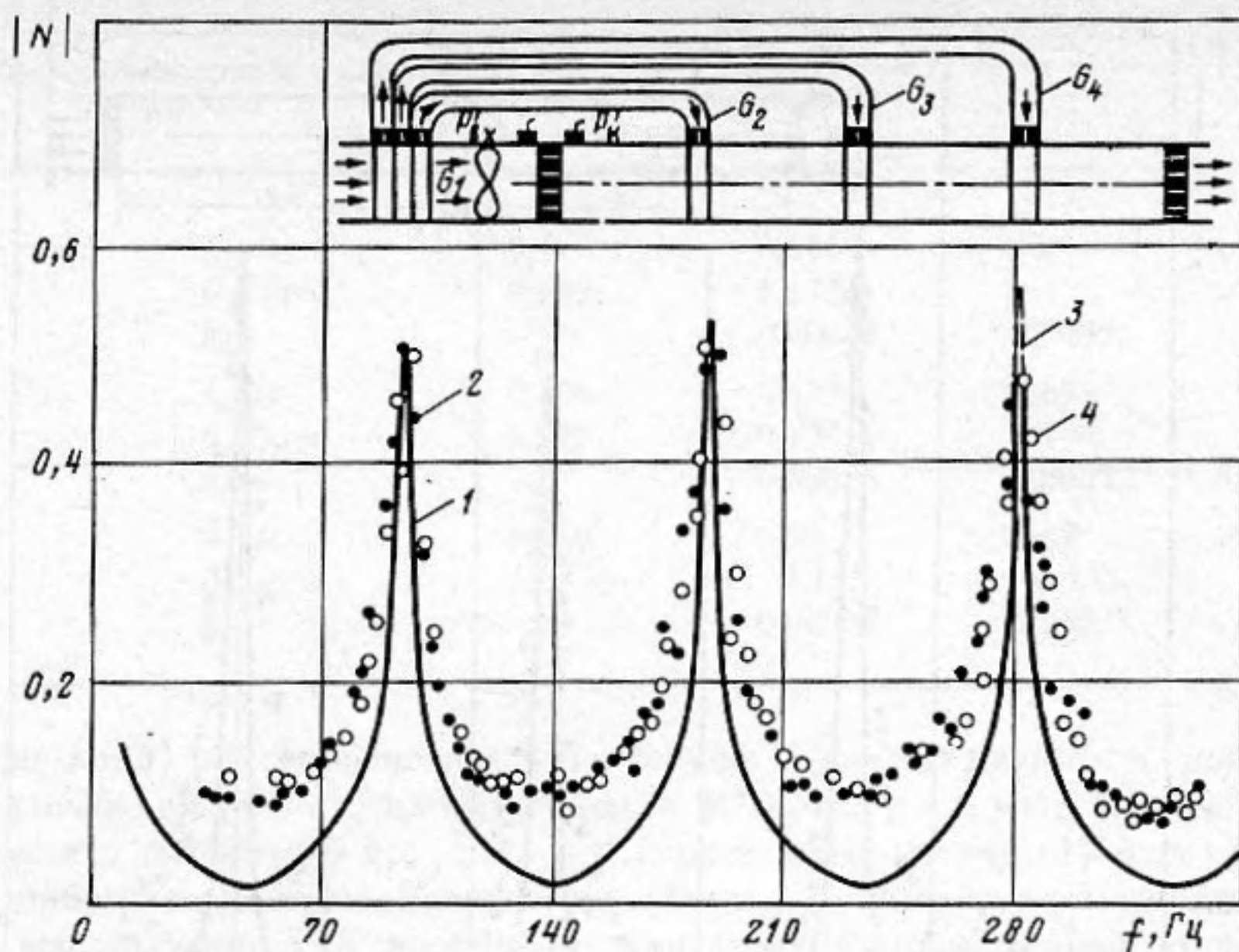


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики газового тракта с сосредоточенным вдувом части расхода (1 — расчет № 1, 2 — эксперимент № 1; 3 — расчет № 2, 4 — эксперимент № 2)

Исследуемый газовый тракт был выполнен в виде набора из четырех одинаковых вставок цилиндрической формы $D = 0,086$ м и трех колец такого же диаметра, но с насверленными равномерно по поперечному сечению восемью отверстиями, через которые осуществлялся сброс или вдув части расхода. Меняя площадь отверстий и взаимное расположение вставок и колец можно изменять величину и местоположение сброса или вдува. На отверстиях в случае сброса и в случае вдува обеспечивался сверхкритический перепад давления. На входе в исследуемый тракт и на выходе из него стояли решетки сверхкритического перепада, которые акустически изолировали газовый тракт, а также выполняли методические функции [6]. Суммарная длина тракта составляла 2,048 м. Во всех сериях испытаний поддерживался одинаковый режим работы установки: давление в тракте $P_K \approx 0,66$ МПа, температура $T \approx 90$ °С, суммарный расход газа, выходящего из подогревателя, $G \approx 1,23$ кг/с. Колебания перед входной решеткой возбуждались пульсатором с гидравлическим приводом. Частота вращения вала пульсатора регистрировалась датчиком положения емкостного типа. Пульсации давления регистрировались малоинерционными датчиками давления ДДИ-20 в двух точках (на рис. 1, 2 — $P'_{вх}$, P'_K на расстоянии 0,024 м от входной решетки). Сигналы с датчиков давления и датчика положения записывались на магнитофон для последующей обработки с помощью вычислительного комплекса, включающего электронный следящий фильтр и ЭВМ М-6000. Результаты обработки выдавались в виде графиков и числового материала. При обработке экспериментальных данных определялась частотная характеристика $N(f) = \delta \bar{P}_K / \delta \bar{P}_{вх}$, где

$$\delta \bar{P}_K = P'_K / P_K, \quad \delta \bar{P}_{вх} = P'_{вх} / P_{вх}.$$

Расчеты проводились по методу, представленному ранее в работе [1] и основанному на представлении уравнений, описывающих одномерное изэнтропическое периодическое течение невязкого газа в участке тракта или местном сопротивлении, в форме уравнений четырехполюсника (т.е. двух линейных уравнений, связывающих две переменные в одном сечении с этими же переменными в другом сечении) в переменных δH , δG (где $\delta H = H'/C^2 = (1 - M^2) \delta P / \gamma + M^2 \delta G$, $\delta G = \delta \rho + \delta U$ — соответственно без-

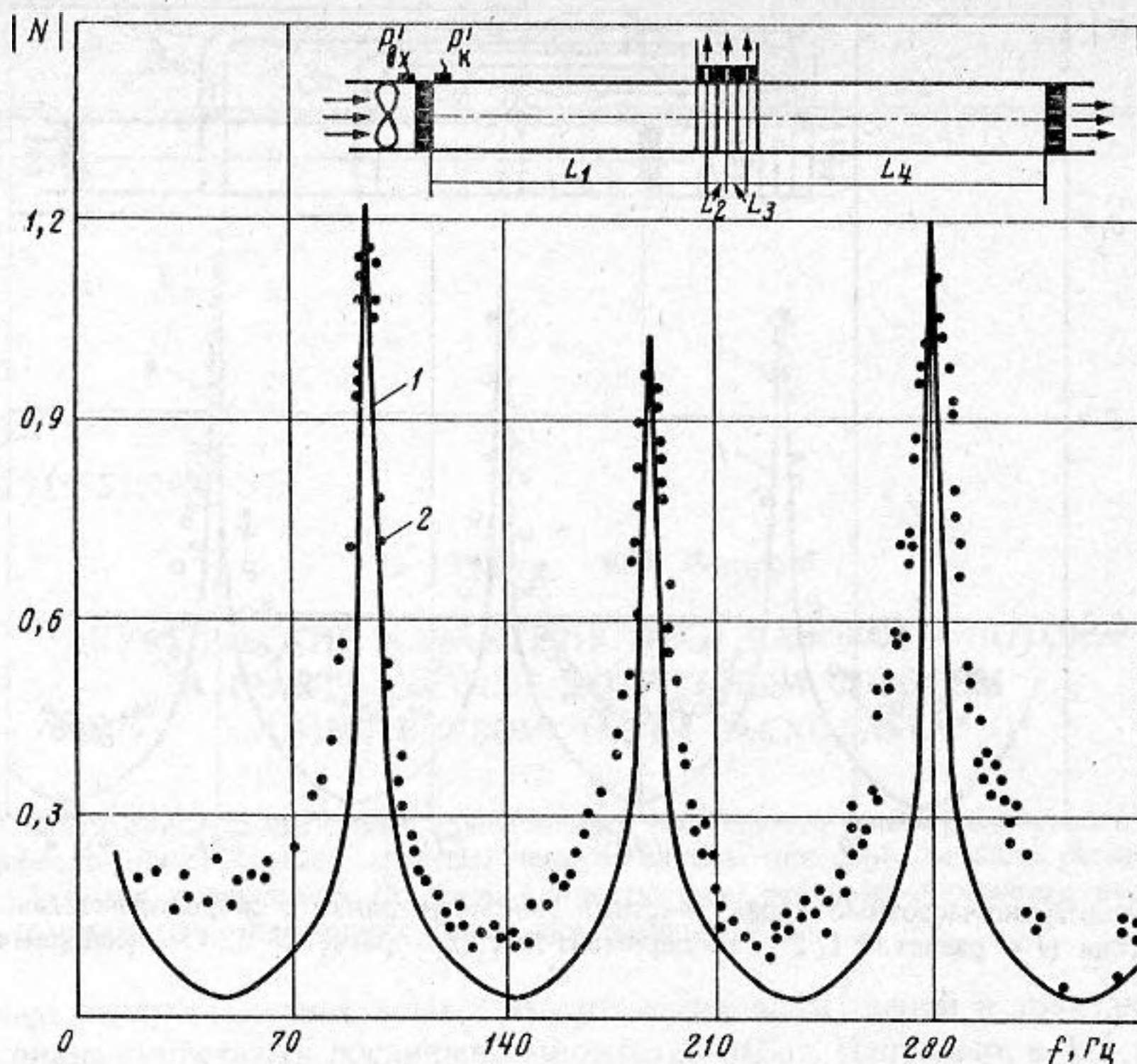


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика газового тракта с сосредоточенным сбросом части расхода (1 — расчет, 2 — эксперимент)

размерные пульсации полной энтальпии и расхода, $\delta\rho = \rho'/\rho$, $\delta U = U'/U$, U — скорость, γ — показатель адиабаты, $M = U/C$ — число Маха).

При частичном вдуве газа (см. рис. 1), так как основной пульсирующий расход G_1 и невозмущенный (это специально контролировалось) вдуваемый газ G_i ($i > 1$, номер участка тракта) брался из одного и того же подогревателя и, как следствие, обладал одними и теми же термодинамическими свойствами, соотношения четырех-полюсника в сечении вдува имеют вид [1]:

$$\begin{aligned} \delta H_i^+ &= \delta H_{i+1}^- + h_{i+1} \delta G_{i+1}^-, \\ \delta G_i^+ &= \left(1 + \frac{G_{i+1}}{G_i}\right) \delta G_{i+1}^-, \end{aligned} \quad (1)$$

где $h_{i+1} = 2(P_i^0 - P_{i+1}^0)/P_{i+1}^0$ — относительный удвоенный перепад полного давления в сечении вдува, а индексы "+" и "-" относят соответствующие параметры к сечениям непосредственно до вдува и после вдува.

На рис. 1 представлены экспериментальные и теоретические значения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $|N(f)|$ газового тракта с сосредоточенным вдувом части расхода через боковую поверхность. Длины участков тракта и параметры газа указаны в таблице (№ 1, 2). Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показывает, что предлагаемая методика позволяет вполне удовлетворительно рассчитать акустические свойства газового тракта с сосредоточенным вдувом части расхода газа. Из сравнения двух экспериментов видно, что местоположение вдува по тракту при одинаковом отношении вдуваемого расхода к основному расходу газа практически не влияет на величины максимумов АЧХ для исследуемых первых трех резонансов. Небольшое отличие величины максимума АЧХ для третьего резонанса

№ эксперимента	Длина тракта и параметры газа	Номера участков тракта (i)			
		1	2	3	4
1	$L_i, \text{м}$	0,418	0,633	0,633	0,364
	$G_i, \text{кг/с}$	0,699	0,177	0,177	0,177
	h_i	—	0,00035	0,00035	0,00035
2	$L_i, \text{м}$	0,106	0,633	0,633	0,676
	$G_i, \text{кг/с}$	0,699	0,177	0,177	0,177
	h_i	—	0,00035	0,00035	0,00035
3	$L_i, \text{м}$	0,959	0,09	0,09	0,909
	$G_i, \text{кг/с}$	1,23	-0,155	-0,155	-0,155
	h_i	—	0,00035	0,00035	0,00035

(ср. кривые 1 и 3) обусловлено тем, что в первом случае газ вдувается практически в пучности колебаний расхода третьей моды, а во втором — в узлы колебаний расхода, при этом вклад слагаемого $h_{i+1}\delta G_{i+1}$ в первое соотношение (1) будет либо максимальным, либо равным нулю. Если же пренебречь потерями, то, как показали расчеты, величины максимумов АЧХ вообще не зависят от местоположения вдува, а зависят только от отношения вдуваемого расхода к полному расходу газа в тракте.

При частичном сбросе газа (см. рис. 2) соотношения четырехполюсника в сечении сброса имеют вид [1, 7].

$$\begin{aligned} \delta H_i^+ &= \delta H_{i+1}^- + h_{i+1}\delta G_{i+1}^-, \\ \delta G_i^+ &= -\frac{G_{i+1}}{G_i\chi_*} \delta H_{i+1}^- + \left(1 + \frac{G_{i+1}}{G_i}\right) \delta G_{i+1}^-, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\chi_* = (\delta H/\delta G)_* = [2/(\gamma + 1)] [1 + M^2(\gamma - 1)/2]$ и определяет связь δH и δG при течении газа через местное сопротивление, на котором реализуется сверхкритический перепад давления.

В эксперименте определялась АЧХ газового тракта с частичным сбросом газа приблизительно из середины тракта (см. рис. 2). Длины участков тракта и параметры газа указаны в таблице (№ 3). Сброс именно из середины тракта исследовался потому, что при этом, как показали расчеты, оказывается максимальное влияние на первую и третью моды колебаний и практически отсутствует для второй моды колебаний, так как в середине тракта находятся узлы колебаний полной энтальпии первой и третьей мод и пучность колебаний полной энтальпии второй моды, при этом слагаемое $-G_{i+1}\delta H_{i+1}^-/G_i\chi_*$ во втором соотношении (2) принимает либо максимальное значение, либо равно нулю. Хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными показывает, что при замене соотношений (1), используемых для случая вдува газа, на соотношения (2), предлагаемая методика позволяет также вполне удовлетворительно рассчитать акустические свойства газового тракта с сосредоточенным сбросом части расхода через боковую поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебединский Е.В., Мосолов С.В., Никифоров М.В. Экспериментальное исследование динамических свойств потока в тракте периодической структуры // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1989. № 3. С. 126–134.
2. Колесников К.С., Кинелев В.Г., Шкапов П.М. Колебания двухфазного потока в трубопроводе // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1982. № 4. С. 167–171.
3. Гликман Б.Ф., Лосенков А.С. Акустические характеристики газового потока в трактах с поворотом // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 2. С. 245–248.

4. Гликман Б.Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989. 296 с.
5. Гликман Б.Ф., Гурьев В.А. Нестационарное неизотермическое течение сжимаемого газа в канале с путевым отбором // Инж.-физ. журн. 1988. Т. 54. № 4. С. 543–550.
6. Лебединский Е.В., Натанзон М.С., Никифоров М.В. Экспериментальный метод определения динамических свойств газовых потоков // Акуст. журн. 1982. Т. 28. № 5. С. 660–664.
7. Гликман Б.Ф., Лосенков А.С. Анализ акустических характеристик разветвленных газовых трактов с использованием сигнальных графов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1986. № 2. С. 151–155.

Научно-исследовательский институт
тепловых процессов

Поступило в редакцию
25.03.91
После исправления
07.05.92

Yu.V. Firsov

ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF GAS FLOW IN DUCT WITH SHARP INCREASE OR DECREASE OF STATIONARY MASS FLOW RATE

An analysis of the relation between acoustic properties of a gas flow and parameters of sharp increase or decrease of a stationary mass flow rate has been performed for a straight channel with an inlet and an outlet with super-critical pressure difference. Plane harmonical sound waves have been generated in the experiment far upstream of the inlet by a special device with sinusoidal variation of the cross-section. The parameters measured directly are instantaneous and fluctuating pressure values directly ahead and behind the inlet. However, the ratio of these parameters is known to be proportional to the exit impedance of the duct under investigation. The equations for the one-dimensional harmonical isentropic flow of a nonviscous gas are in the form of a dynamic transfer function which correlates fluctuating mass flow rate and total enthalpy at the inlet of the duct element to the same parameters at the outlet. The predicted results have been compared with the data obtained experimentally.