

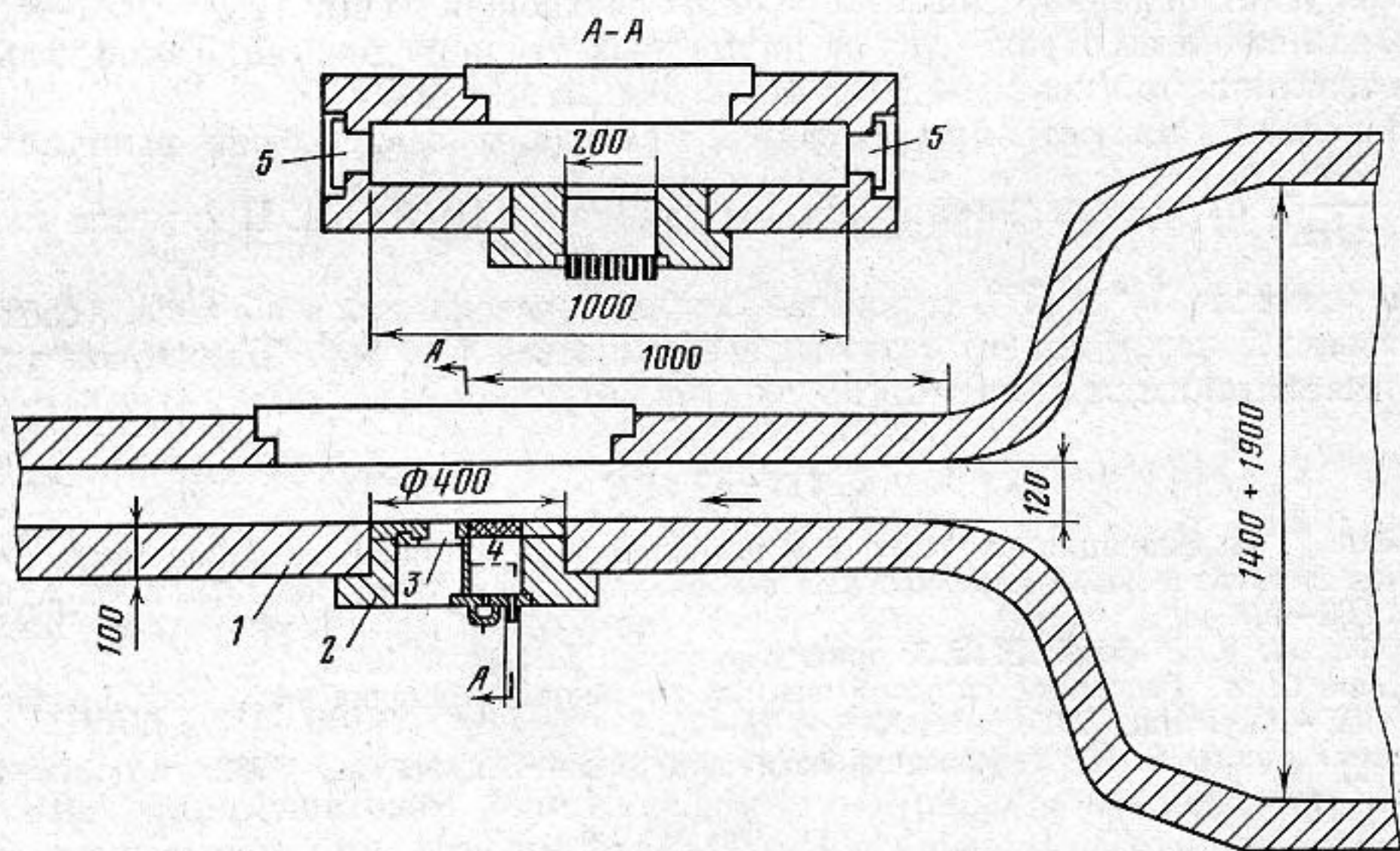
УДК 534.231:532.542.4

ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ВОДНОГО ПОТОКА ПРИ ВДУВЕ ГАЗА

Лямшев Л. М., Челноков Б. И., Шустиков А. Г.

Представлены результаты экспериментальных исследований эффектов снижения пристеночных пульсаций давления в турбулентном пограничном слое водного потока с газонасыщением при больших скоростях обтекания в зависимости от объемного газосодержания.

Подача газа по нормали к стенке, обтекаемой потоком жидкости, приводит к уменьшению поверхностного трения и изменению процессов теплообмена между потоком и стенкой. Одновременно могут измениться пульсационные нагрузки на стенку, которые нередко вызывают усталостное и эрозионное разрушение конструкций, вибрации и шумы. Кроме того, газонасыщение является одним из способов управления турбулентным пограничным слоем, которое предпринимается с целью изменения в желательном направлении как гидродинамических, так и акустических характеристик турбулентного течения [1, 2].

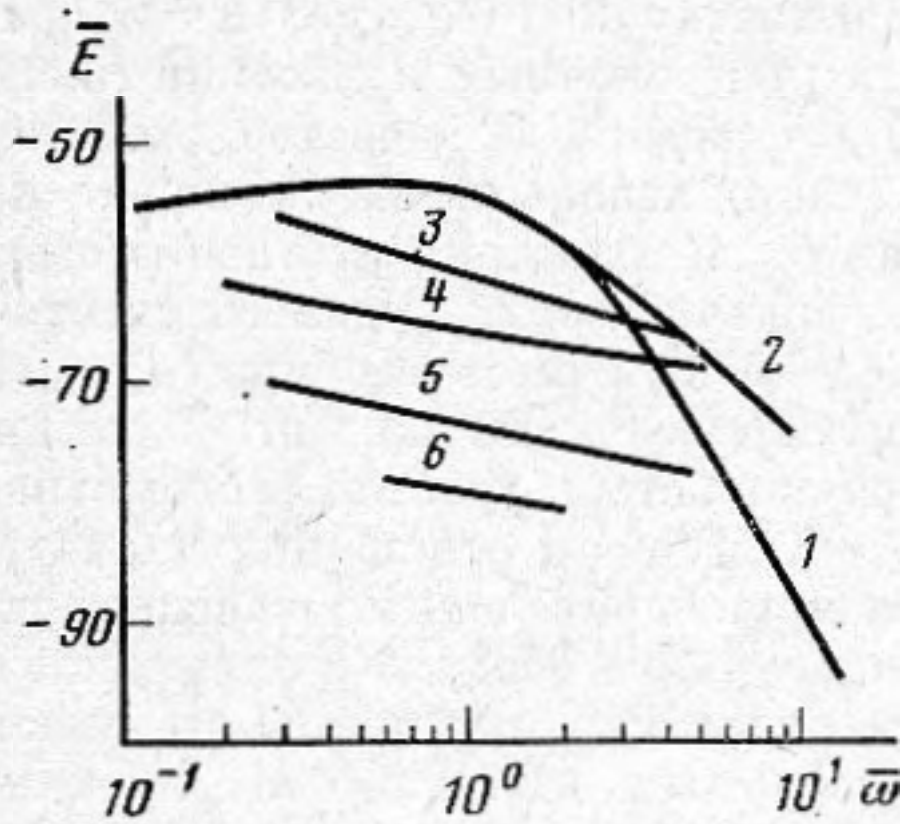


Фиг. 1. Гидродинамическая труба с проницаемым участком для управления пограничным слоем

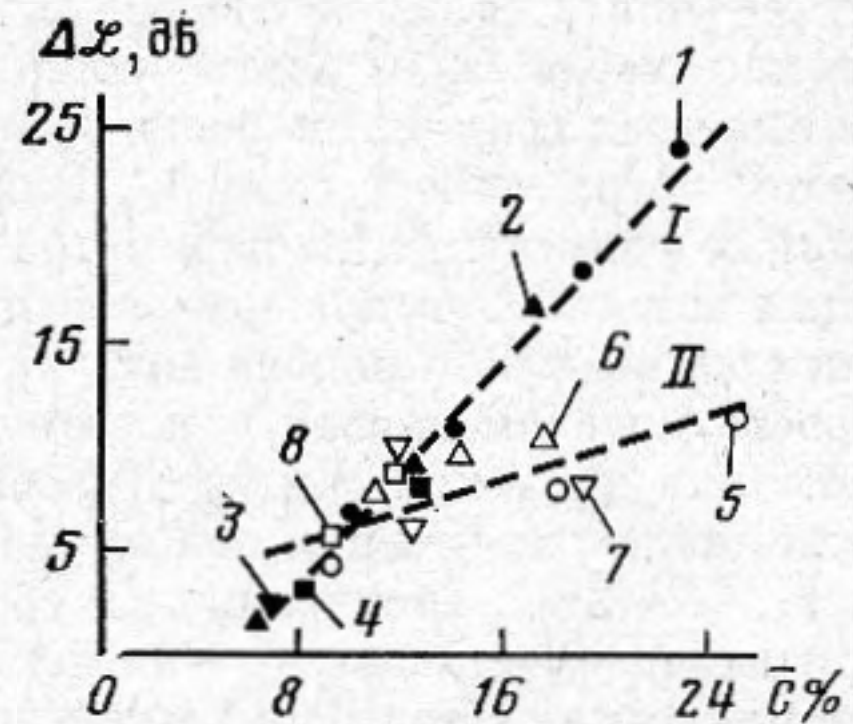
При вдуве газа в пограничный слой водного потока в пристеночной области образуется двухфазное течение, структура которого зависит от скорости набегающего потока, способа подачи воздуха, его количества, а также распределения среднего давления в потоке. По характеру распределения газа в водном потоке различают два режима газонасыщения: пленочный, при котором наблюдается четко выраженная достаточно устойчивая граница раздела газ — жидкость, и диффузионный (или пузырьковый) при котором вблизи стенки движется газожидкостная смесь — насыщенная газовыми пузырьками. Эффекты снижения пульсаций давления при диффузионном режиме газонасыщения были зарегистрированы в работах [3, 4]. Данная статья посвящена исследованию эффектов снижения пристеночных пульсаций давления в случае диффузионного режима

газонасыщения в зависимости от объемного газосодержания при больших скоростях обтекания, разном гидростатическом давлении в потоке для двух конструктивных вариантов проницаемого участка, через который осуществлялся вдув воздуха в поток жидкости.

Измерения проводились на стенке прямоугольного рабочего участка гидродинамической трубы (см. фиг. 1). Заподлицо с поверхностью стенки трубы 1 устанавливался специальный блок 2 с двумя отделениями, одно из которых служило камерой подачи газа 4, а другое 3, расположенное ниже по течению, предназначалось для размещения приемников пульсаций давления. Над камерой подачи газа располагался проницаемый участок. В месте расположения датчиков давления обтекаемая поверхность



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2 Семейство спектров с параметром \bar{C} пристеночных пульсаций давления при различных режимах газонасыщения двухфазного турбулентного пограничного слоя. 1 — $\bar{C}=0\%$, 2 — 2, 3 — 10%, 4 — 15%, 5 — 20, 6 — $\bar{C}=25\%$

Фиг. 3. Зависимость эффекта снижения пристеночных пульсаций давления в двухфазном турбулентном пограничном слое от типа проницаемого участка ($P_\infty = 2 \text{ кг/см}^2$). I — пористый участок, 1 — $U_\infty = 8 \text{ м/с}$, 2 — 12, 3 — 16, 4 — 20 м/с; II — перфорированный участок, 5 — 8 м/с, 6 — 12, 7 — 16, 8 — 20 м/с

представляла собой гладкую непроницаемую стальную стенку толщиной 30 мм. Прозрачные окна 5 служили для визуальных измерений. В экспериментах в широких пределах варьировалось объемное газосодержание в пограничном слое, испытывались два конструктивных варианта проницаемого покрытия (мелкие поры и перфорация), изменялось гидростатическое давление. Протяженность пористого и перфорированного участков в направлении, перпендикулярном потоку, составляла 200 мм, в направлении по потоку — 110 мм. Размеры пор на пористом участке составляли примерно 150 микрон. Диаметр отверстий перфорированного пояса равнялся 0,8 мм. Отверстия располагались рядами, ориентированными поперек потока, причем наружный ряд был сдвинут относительно следующего на 1 мм. Расстояние между отверстиями в ряду и расстояние между рядами составляло 3 мм. Шероховатость перфорированной поверхности была порядка 10 микрон, а пористого материала — порядка 40 микрон.

Одновременно измерялись следующие величины: пристеночные пульсации давления в пяти точках обтекаемой поверхности, расположенных либо вдоль, либо поперек потока, скорость обтекания U_∞ , среднее гидростатическое давление в рабочем участке гидротрубы P_∞ , суммарный объемный расход подаваемого воздуха Q , толщина пузырьковой пелены h в районе датчиков пульсаций давления. Среднее объемное газосодержание в пузырьковой пелене \bar{C} рассчитывалось по формуле $\bar{C} = 100\% \frac{Q}{hlU_\infty}$, где $l = 200 \text{ мм}$ — ширина пелены в поперечном направлении. Скорость набегающего потока U_∞ изменялась от 3 до 20 м/сек, соответствующий диапазон чисел Рейнольдса Re_x ($x \sim 1 \text{ м}$) составил $2,5 \cdot 10^6 \div 1,5 \cdot 10^7$. Средняя величина объемной концентрации воздуха в пузырьковой пелене \bar{C} изменялась

от 0,1 до 35%. Абсолютное гидростатическое давление в рабочем участке гидротрубы P_∞ на разных скоростях набегающего потока и при разных концентрациях воздуха поддерживалось примерно постоянным и равным 1, 2 и 3,8 кГ/см². Спектральный анализ проводился в диапазоне частот 200 Гц ÷ 10 кГц с разрешающей способностью ~50 Гц. Корреляционный анализ выполнялся в третьоктавной полосе в диапазоне частот 200 Гц ÷ ÷4 кГц. В статье приводятся результаты измерений, полученные в тех областях частот, где спектральный уровень пульсаций давления превышал уровень вибрационной помехи не менее, чем на 10 дБ.

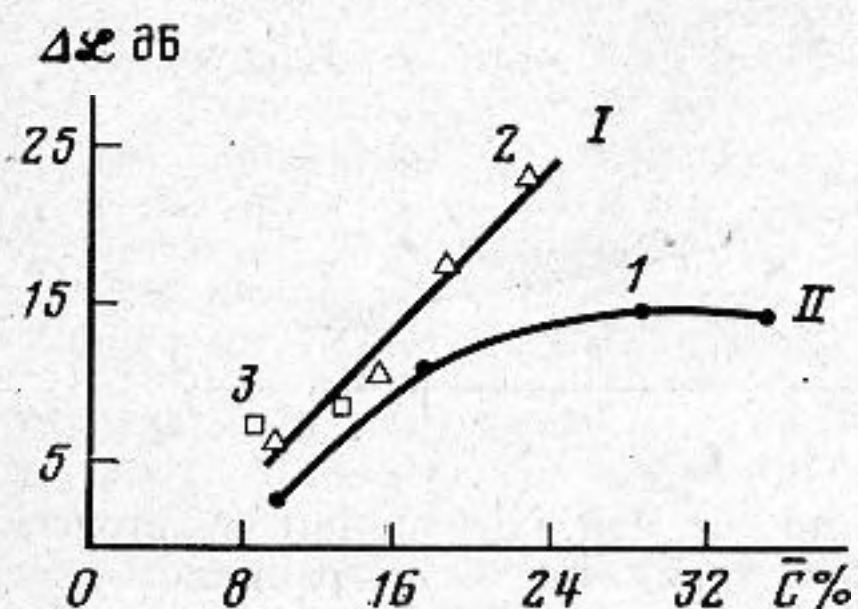
Исследования пульсаций давления в турбулентном пограничном слое с газонасыщением на больших скоростях обтекания (8, 12, 16 и 20 м/с) позволили получить семейство спектров с параметром \bar{C} пристеночных пульсаций давления (см. фиг. 2) в координатах \bar{E} и $\bar{\omega}$, где $\bar{E} = 10 \lg E / (2\rho^2 U_\infty^3 \delta_0^*)$, E — спектральная плотность пристеночных пульсаций давления, ρ — плотность воды; $\bar{\omega} = 2\pi f / \delta_0^* / U_\infty$, f — частота. В качестве характерных масштабов были взяты величины, часто используемые в случае непроницаемых границ: скорость обтекания U_∞ и толщина вытеснения однофазного пограничного слоя δ_0^* . Влияние подачи воздуха удалось учесть с помощью единственного параметра — средней величины объемной концентрации воздуха \bar{C} в пузырьковой пелене. Приведенные на фиг. 2 данные были получены при подаче воздуха через пористый участок, абсолютном гидростатическом давлении в потоке $P_\infty = 2$ кГ/см² и отношении диаметра приемника давления d к $\delta_0^* \sim 0,8$. Анализируя приведенные зависимости, можно показать, что при небольшой концентрации воздуха в пузырьковой пелене ($\bar{C} = 2\%$) спектральный уровень пульсаций давления на низких частотах не уменьшается, а на высоких частотах имеет место заметный рост пульсаций. Когда объемная концентрация воздуха в турбулентном пограничном слое становится равной 10% или выше, то наблюдаются эффекты снижения спектрального уровня пристеночных пульсаций давления. На этих режимах результаты описываемого эксперимента и данные работы [3] во многом согласуются. Эффекты снижения проявляются прежде всего в области частот порядка U_∞ / δ_0 (δ_0 — толщина однофазного турбулентного пограничного слоя), а затем, по мере увеличения концентрации воздуха, растут по величине, охватывая все более широкую область частот.

При подаче воздуха через перфорированный участок, характер спектра пульсаций давления не изменяется, однако величина эффектов снижения несколько падает. На фиг. 3 сравниваются эффекты снижения на частотах $f \sim U_\infty / \delta_0$, полученные при подаче воздуха через пористый и перфорированный участок на разных скоростях обтекания. По вертикальной оси отложены эффекты снижения $\Delta \mathcal{L}$, которые определялись как отклонения в децибелах спектрального уровня пульсаций давления в управляемом пограничном слое от уровня пульсаций в однородном потоке. Пунктирная линия I показывает характер изменения эффекта при подаче воздуха через пористый участок, пунктирная линия II — при подаче воздуха через перфорированный участок. Величина эффекта снижения на всех скоростях обтекания ($U_\infty = 8 \div 20$ м/с) растет по мере увеличения средней концентрации воздуха \bar{C} практически по линейному закону, причем наклон прямой зависит от типа проницаемого участка.

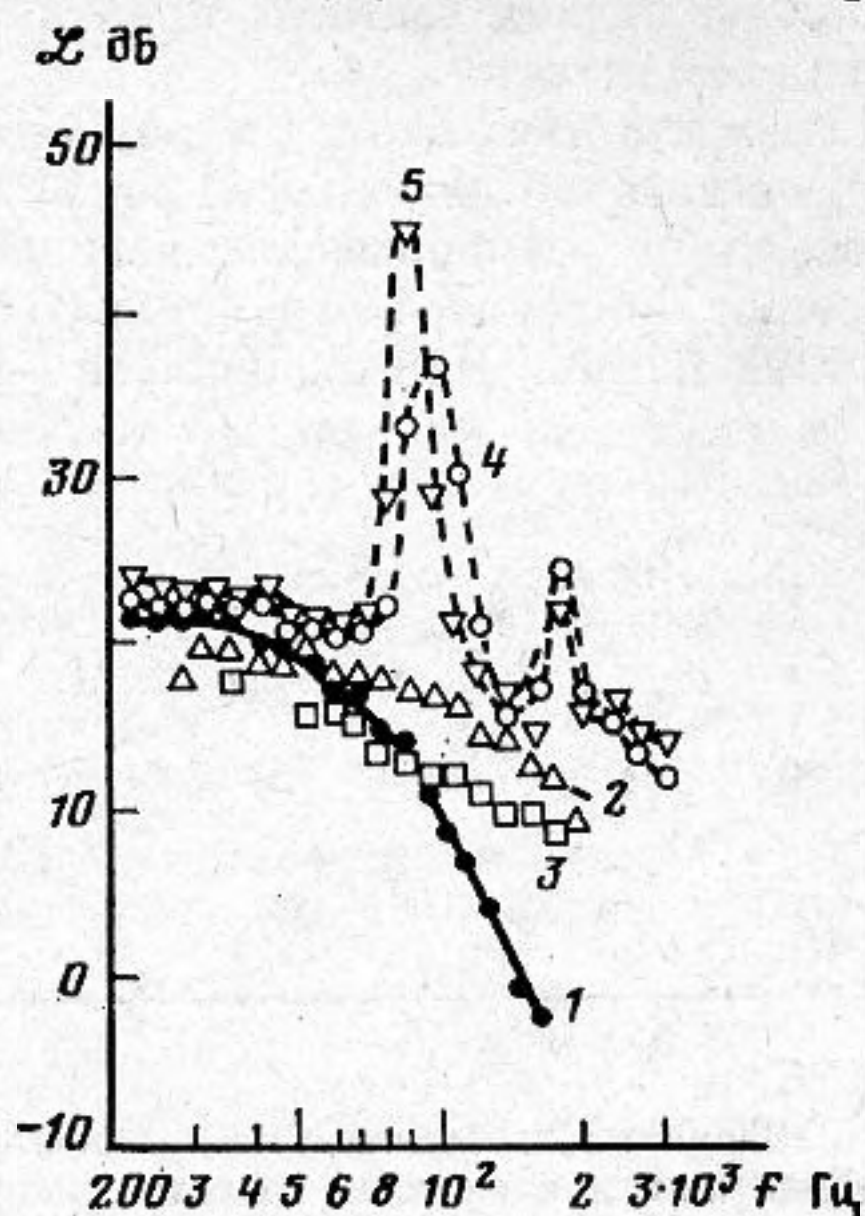
Влияние гидростатического давления на эффекты снижения интенсивности пульсаций давления иллюстрируют зависимости, приведенные на фиг. 4. По осям отложены те же величины, что и на фиг. 3. Линия I показывает характер изменения эффекта в условиях, когда абсолютное гидростатическое давление в потоке равнялось 2 и 3,8 кГ/см². В этом диапазоне влияние гидростатического давления достаточно четко не прослеживается. Линия II соответствует абсолютному давлению в 1 кГ/см². В этом случае зависимость эффекта снижения от концентрации воздуха в пограничном слое изменяется — величина эффекта снижения оказывается меньше. Заметим здесь, что сравнительно небольшие эффекты снижения средней величины и пульсаций поверхностного трения, зарегистрированные авторами работы [4], могут быть также связаны с малым гидростатическим

давлением, которое имелось в их гидродинамической установке гравитационного типа.

Интересно отметить, что вдув воздуха на малых скоростях обтекания ($U_\infty = 3 \div 4$ м/с) может приводить к существенному увеличению спектральной плотности пристеночных пульсаций давления (см. фиг. 5). По вертикальной оси здесь отложена величина спектральной плотности \mathcal{L} в децибелах (относительно уровня $0,1$ Па/√Гц, по горизонтальной оси — частота в Гц. Присутствие малых концентраций ($\bar{C} = 0,8$ и $2,5\%$) пузырьков воздуха в турбулентном пограничном



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Влияние гидростатического давления на эффект снижения пристеночных пульсаций давления в двухфазном турбулентном пограничном слое (подача воздуха через пористый участок, $U_\infty = 8$ м/с). 1 — $P_\infty = 1$ кг/см², 2 — 2, 3 — 3,8 кг/см²

Фиг. 5. Спектры пристеночных пульсаций давления в двухфазном турбулентном пограничном слое при малых скоростях обтекания ($U_\infty = 3$ м/с, $P_\infty = 2$ кг/см²). 1 — $\bar{C} = 0\%$, 2 — 22, 3 — 35, 4 — 2,5, 5 — 0,8%

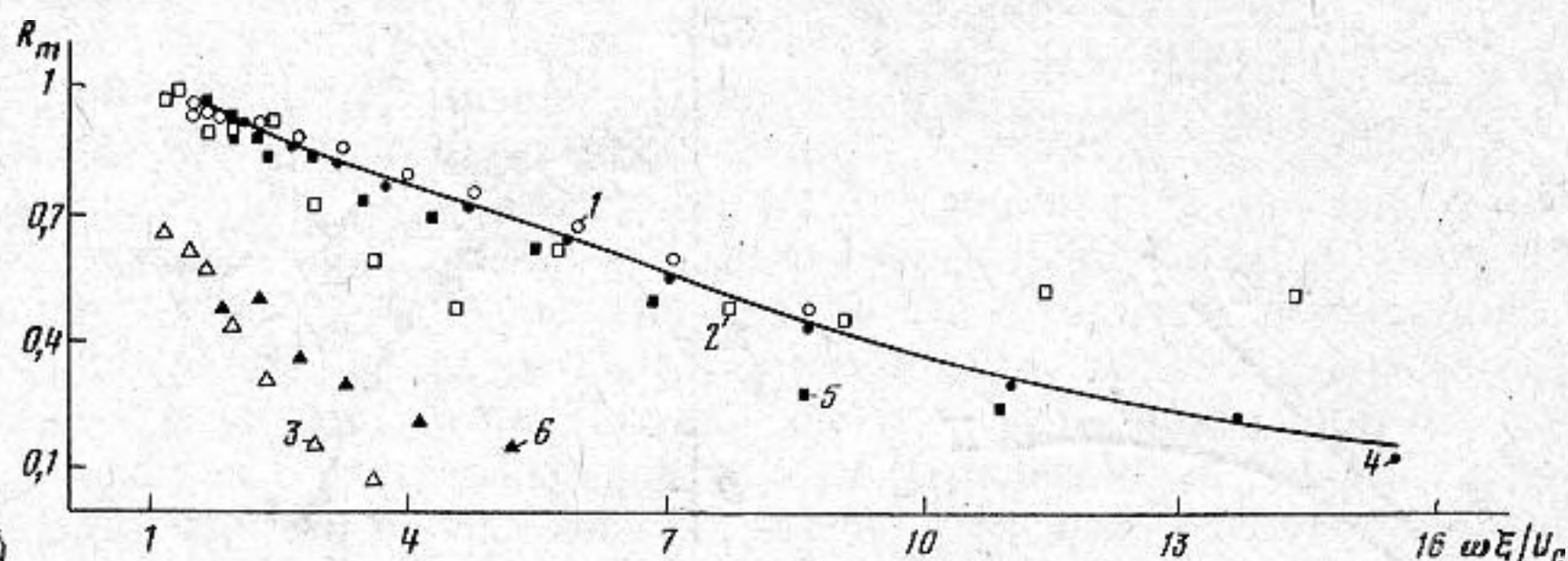
слое приводит к резкому подъему (резонансного типа) спектральной плотности пристеночных пульсаций давления на частотах $1 \div 2$ кГц. При большом объемном содержании воздуха ($\bar{C} = 22$ и 35%) резонансные пики пропадают, и уровень спектральной плотности пристеночных пульсаций давления на низких частотах оказывается несколько ниже, а на высоких частотах на $5 \div 15$ дБ выше, чем в неуправляемом однофазном пограничном слое.

Перейдем к рассмотрению результатов корреляционных измерений. Для корреляционной обработки были выбраны режимы со скоростью обтекания $U_\infty = 8$ м/с. На фиг. 6 представлены данные, характеризующие изменения максимума коэффициента продольной пространственно-временной корреляции R_m пристеночных пульсаций давления при вдуве воздуха через пористый участок в турбулентный пограничный слой водного потока. По вертикальной оси отложены значения коэффициента корреляции R_m , а по горизонтальной — безразмерной величины $\omega \xi / U_c$ (ξ — расстояние между приемниками давления, U_c — скорость сноса, ω — круговая частота). Отметим, что характерные скорости сноса в двухфазном турбулентном пограничном слое по мере увеличения объемного газосодержания в потоке несколько возрастают по сравнению со случаем однофазного неуправляемого пограничного слоя. Для приводимых режимов это возрастание не превышает 15% . Сплошная линия на фиг. 6 соответствует экспериментальным данным, полученным в однофазном пограничном слое для разных ξ . Анализ приведенных данных позволяет сделать вывод, что наличие больших концентраций воздуха в турбулентном пограничном слое приводит к заметному уменьшению продольной корреляции пристеночных пульсаций давления. Тот факт, что для $\bar{C} = 15\%$ при одних и тех же значениях безразмерной величины $\omega \xi / U_c$ точки, соответствующие большему ξ , ложатся выше, говорит о сравнительно более медленном спаде продоль-

ной корреляции в случае больших концентраций воздуха, чем в однофазном пограничном слое. При концентрациях воздуха $\bar{C}=2\%$ значения коэффициента корреляции ведут себя нерегулярным образом.

Поперечная корреляция в турбулентном пограничном слое с газонасыщением на низких частотах практически не изменяется, а при $f > 2$ кГц заметно возрастает.

Явления в двухфазных турбулентных потоках очень сложны и пока еще недостаточно изучены. Поэтому трудно дать полное объяснение описанных выше экспериментальных фактов. При обсуждении результатов измерений приходится ограничиваться лишь общими соображениями и сопоставлениями. Наблюдавшиеся эффекты связаны как с изменением



Фиг. 6. Зависимость максимума коэффициента продольной корреляции пристеночных пульсаций давления от частоты в двухфазном турбулентном пограничном слое ($U_\infty=8$ м/с, $P_\infty=2$ кг/см²). 1 — $\bar{C}=0\%$, 2 — 2, 3 — 15% при $\xi_1=3$ мм; 4 — $\bar{C}=0\%$, 5 — 2, 6 — 15% при $\xi_2=6$ мм

характеристик турбулентности в жидкости, так и с динамикой газовых полостей, находящихся под воздействием турбулентной среды намного большей плотности. Острые пики в спектре на фиг. 5, по-видимому, являются следствием возбуждения пузырьков турбулентностью. Резонансным частотам 1÷2 кГц при давлении 2 кг/см² соответствуют воздушные пузырьки диаметром 4,6÷2,3 мм. Существование в турбулентном потоке воздушных образований таких размеров вполне возможно. При увеличении скорости обтекания размеры пузырьков, вероятно, уменьшаются и явления резонансного типа пропадают.

Эффекты широкополосного повышения спектрального уровня на высоких частотах в случае малых концентраций воздуха могут быть объяснены, в частности, повышением интенсивности турбулентности жидкости. Поскольку поступающие в поток пузырьки воздуха из-за конечной инерционности не сразу разгоняются до скорости потока, то они представляют собой своеобразную пространственную решетку. Пульсации давления в следе за такой решеткой, естественно, увеличиваются. Оценочные расчеты, выполненные на основании теоретической работы [5], применительно к условиям описываемых экспериментов показали правомерность таких представлений. Нерегулярное поведение коэффициента корреляции, которое наблюдалось в случае малых концентраций воздуха в пограничном слое (см. фиг. 6) вообще характерно для турбулентных потоков за изолированными препятствиями [6]. Таким образом, результаты корреляционного анализа также не противоречат гипотезе о том, что малые количества пузырьков газа недалеко от места вдува могут представлять собой своеобразную пространственную решетку, обтекаемую потоком.

При увеличении количества воздуха в пограничном слое расстояние между пузырьками газа уменьшается. В случае малых пузырьков оно может оказаться весьма малой величиной, сравнимой с колмогоровским масштабом турбулентности [3]. Генерация турбулентности в жидкости в таких условиях, по-видимому, сильно затруднена. Важно также отметить, что при увеличении скорости обтекания пузырьки концентрируются именно в пристеночной области, где в обычных условиях велика генерация турбулентности в пограничном слое.

Итак, проведенные исследования показали, что спектральная плотность и коррелированность пристеночных пульсаций давления в двухфазном пограничном слое на больших скоростях обтекания и при достаточно больших концентрациях воздуха оказываются существенно меньше, чем в однофазных потоках.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lymshew L. M.* Acoustics of controlled boundary layer.— Proc. VII Int. Congr. Acoust., Budapest, 1971, N 4, p. 377—380.
2. *Лямшев Л. М.* Акустика управляемого пограничного слоя.— Вестн. АН СССР, 1973, № 7, с. 22—31.
3. *Мизиренко Г. С., Евсеев А. Р.* Турбулентный пограничный слой с газонасыщением.— В кн.: Проблемы теплофизики и физической гидродинамики. Новосибирск: Наука, 1974.
4. *Дубнищев Ю. Н., Евсеев А. Р., Соболев В. С., Уткин Е. Н.* Исследование газонасыщенных турбулентных потоков с применением лазерного доплеровского измерителя скорости.— ПМТФ, 1975, № 1, с. 147—153.
5. *Прокофьев В. В.* Задача о движении жидкости и газовых пузырьков с учетом их относительного перемещения.— Изв. АН СССР. Мех. жидк. и газа, 1972, № 3, с. 87—96.
6. *Грешилов Е. М.* Исследование пристеночных пульсаций давления в турбулентном потоке при обтекании шероховатой стенки: Дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. М.: АКИН, 1969.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28.V.1982