

УДК 534.532

© 1993 г. В. П. Ильин, Ю. Л. Левковский

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ КРЫЛА НА ЕГО КРОМОЧНЫЙ ШУМ

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния вибраций крыла на характеристики его кромочного шума. Показано, что роль вибраций сводится к увеличению интенсивности излучения потока и появлению в спектре максимумов на частотах собственных колебаний крыла вследствие увеличения интенсивности и регуляризации сходящихся с выходящей кромки крыла вихрей. Установлено, что кромочный шум вибрирующего крыла и явление пения лопастных механизмов имеют одинаковую физическую природу.

Понятие кромочного шума соответствует обычным допущениям гидродинамики об абсолютной жесткости крыла и отсутствии его перемещений под действием возникающих на крыле нестационарных сил [1—3]. В действительности же порождаемые этими силами вибрации крыла могут усиливать его излучение. Наиболее ярким примером влияния вибраций служит пение — тональное излучение, сопровождающее автоколебания выходящей кромки крыла под действием сил от вихрей, сходящихся с его задней кромки [4, 5].

Механизм влияния вибраций на кромочный шум до настоящего времени не установлен. Роль вибраций двояка:

вибрирующую поверхность крыла можно рассматривать как антенну акустического излучателя;

вибрации выходящей кромки вызывают перестройку потока в ее окрестности, приводя к изменению характеристик кромочного шума.

Основная цель выполненного экспериментального исследования — установить, какой из двух названных механизмов преобладает количественно, так как неизбежность их одновременного действия сомнений не вызывает.

Физическое существо описанных процессов подсказывает схему организации нужного эксперимента.

При реализации первого механизма роль среды ограничена передачей возмущений, поэтому фактор ее движения (при представляющих интерес малых числах Маха) не является определяющим. В то же время реализация второго механизма, обусловленного формированием дополнительной вихревой системы у вибрирующей выходящей кромки, может происходить лишь в движущемся относительно крыла потоке.

Следовательно, искомый ответ будет получен, если изучение крыла зарегистрировать в двух случаях:

- 1) в естественных условиях взаимодействия крыла с натекающим потоком;
- 2) в покоящейся среде, при искусственном возбуждении таких же вибраций.

Если превалирует первый из механизмов, то уровни излучения в обоих случаях должны быть одинаковы, если второй — то в движущемся потоке они должны быть выше.

Реализация такого эксперимента представляет, однако, значительные технические трудности из-за сложности искусственного возбуждения вибраций крыла с той же пространственной структурой и тем же спектральным составом, как и вибрации, возникающие в движущемся потоке. Однако, учитывая сформулированную выше ограниченную цель эксперимента, соблюдение полной тождест-

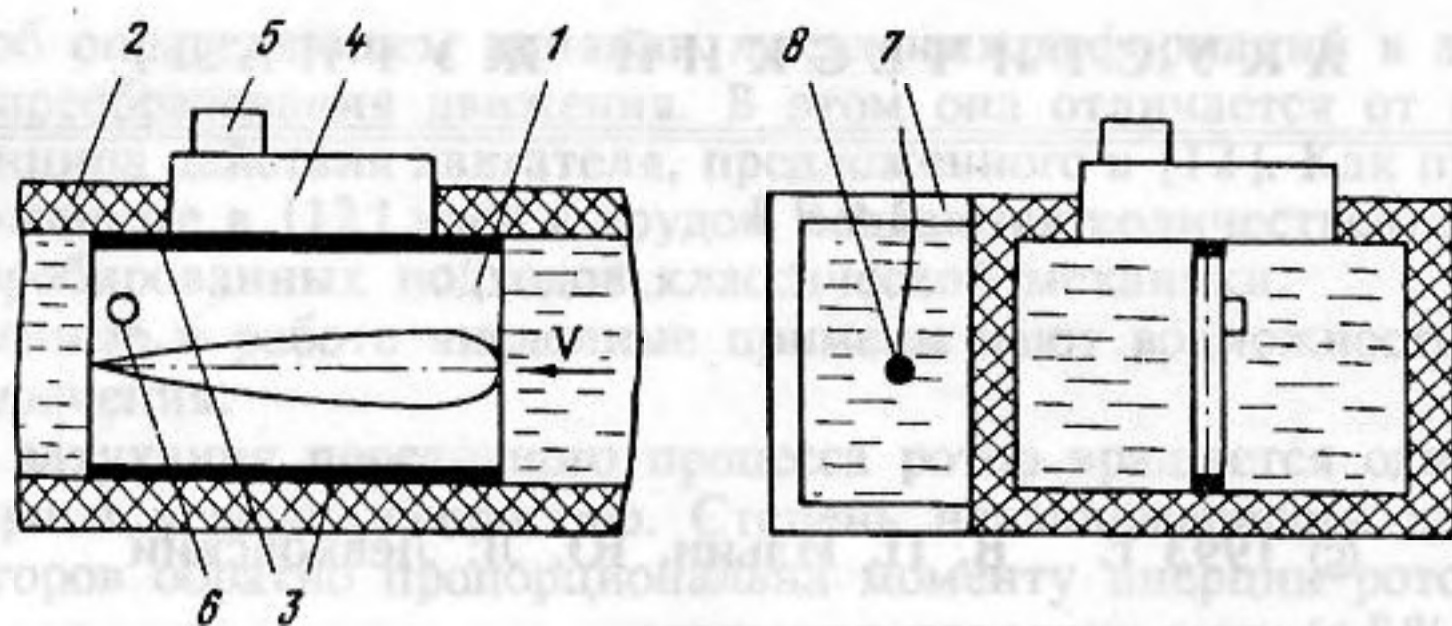


Рис. 1

$K_1, K_2, \delta, \text{дБ}$

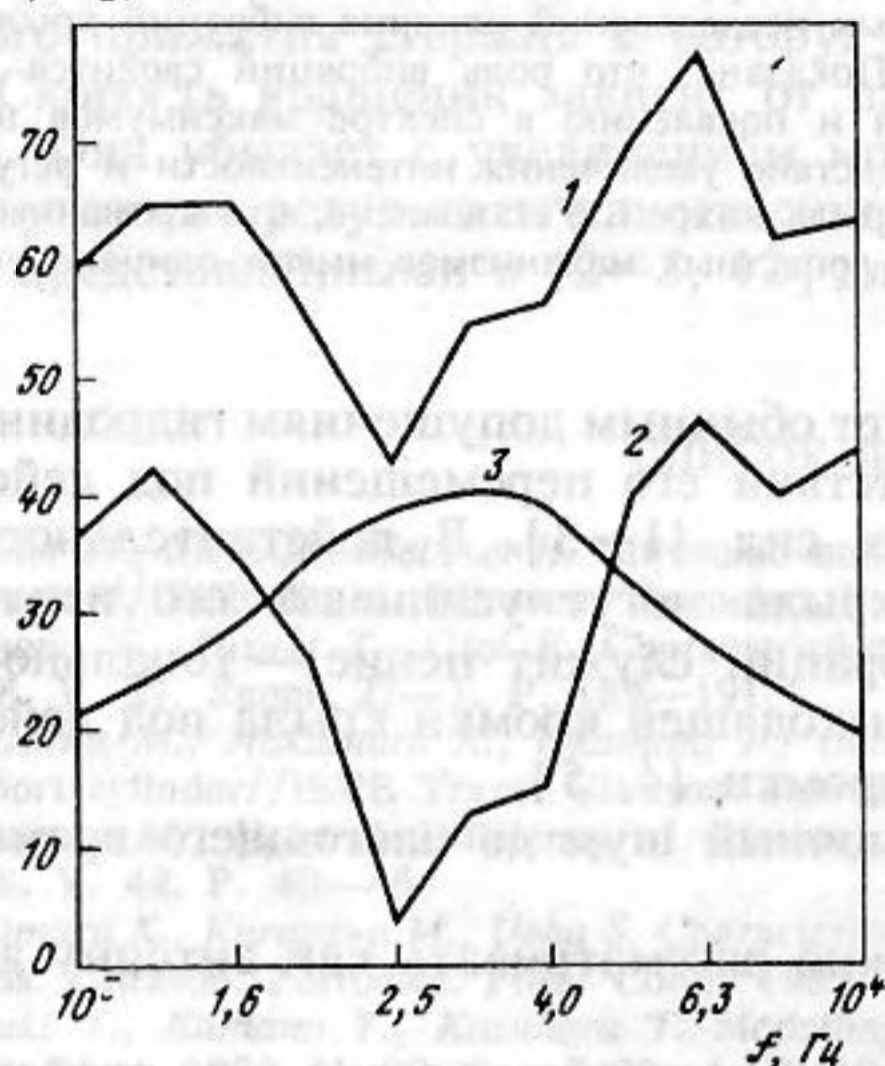


Рис. 2

Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — крыло, 2 — стенки рабочего участка трубы, 3 — резиновые прокладки, 4 — шток крыла, 5 — акселерометр, 6 — пьезоэлектрический преобразователь вибраций, 7 — карман, 8 — гидрофон, V — направление потока

Рис. 2. Нормированные спектральные уровни излучения крыла. 1 — K_1 , 2 — K_2 , 3 — разность уровней δ

венности вибрационных полей крыла, строго говоря, не является обязательным. Дело в том, что при каждом фиксированном значении частоты $f = \text{const}$ измеряемое звуковое давление p в произвольной точке поля и вибрационные ускорения ξ произвольной точки поверхности крыла — линейно связанные величины (в равной степени это касается и других характеристик вибраций — перемещений ξ и скоростей $\dot{\xi}$). По этой причине достаточно сравнить на каждой частоте звуковые давления, соответствующие единичной амплитуде вибраций, получаемые нормировкой спектральных уровней звукового давления спектральными уровнями вибраций:

$$K(f) = 20 \log \frac{p}{p_0} \frac{\xi_0}{\xi} = L_p - L_\xi. \quad (1)$$

Здесь p, p_0 — звуковое давление и его пороговое значение; ξ, ξ_0 — вибрационное ускорение и его пороговое значение; L_p, L_ξ — энергетические спектральные уровни звукового давления и вибраций, фиксируемые в процессе эксперимента.

Определяя разность нормированных указанным способом спектральных уровней звукового давления при вибрациях, возникающих естественным образом, и при их искусственном возбуждении, получим

$$\delta(f) = K_1(f) - K_2(f) = (L_{p_1} - L_{p_2}) - (L_{\xi_1} - L_{\xi_2}). \quad (2)$$

При $\delta(f) \approx 0$ дБ реализуется первый механизм, изучает вибрирующее крыло. При $\delta(f) \gg 0$ дБ излучателем оказывается поток, реализуется второй механизм. Эксперимент проводился в гидродинамической трубе, обладающей благодаря специально предпринятым мерам (амортизации оборудования, звукозаглушению обратного канала, исключению кавитации импеллера) низкими уровнями собственных шумов.

Поясняющая эксперимент схема представлена на рис. 1. Звуковой сигнал, как это обычно делается при акустических измерениях в трубах, регистрировался гидрофоном, размещенным в установленном на звукопрозрачном окне рабочего участка заглушенном кармане. Вибрации крыла с симметричным профилем и 13%-ной максимальной относительной толщиной регистрировались акселерометром, установленным на штоке крыла, которым оно через вибропрокладки крепится к рабочему участку. Искусственное возбуждение вибраций крыла, осуществлялось с помощью пьезоэлектрического преобразователя, крепившегося в различных участках поверхности крыла вблизи выходящей кромки, что объясняется естественным желанием добиться приближенного моделирования места приложения вызывающих вибрацию сил от сходящих в поток вихрей [4].

Интересно отметить, что изменение в пределах задней половины профиля места установки преобразователя практически не сказывалось на величине нормированных уровней излучения (1). Этот результат представляется важным, поскольку исключается возможность трактовки отличия нормированных спектральных уровней $\delta(f)$ как следствия разной пространственной структуры вибрационных полей крыла при естественном и искусственном возбуждении. В противном случае следовало бы допустить, что виброактивные свойства воздействующих на поверхность крыла давлений турбулентной природы существенно отличаются от доставляемых вибропреобразователем, на что нет оснований.

На рис. 2 в качестве примера представлены результаты проведенных испытаний по описанной методике для одного значения скорости натекающего потока $V = 20$ м/с и нулевого угла атаки крыла в виде третьоктавных нормированных спектров $K_1(f)$, $K_2(f)$ и их разности $\delta(f)$. При других значениях параметров потока результат аналогичен: $20 \text{ дБ} \leq \delta(f) \leq 40 \text{ дБ}$. Следовательно, ответственным за излучение является поток.

Таким образом, главная цель исследования достигнута: установлено, что механизм влияния вибраций на кромочный шум состоит в изменении характеристик нестационарного течения вблизи выходящей кромки вследствие ее вибрационных перемещений.

Вместе с тем проделанный эксперимент в принципе не может дать ответа на представляющий несомненный интерес вопрос о количественном вкладе в кромочный шум составляющей, вызванной вибрацией кромки.

Поскольку речь идет не о качественной, а о количественной характеристике, этот ответ не может быть однозначным. Он должен зависеть от конструкции и свойств материала крыла.

Для выполнения оценки применительно к конкретному крылу необходимо сравнить характеристики его излучения и излучения геометрически эквивалентного крыла бесконечной жесткости при одних и тех же параметрах натекающего потока. Однако при экспериментальном способе решения задачи такой путь не реализуем, поскольку бесконечная жесткость крыла в реальных условиях недостижима. По этой причине в поисках ответа на поставленный вопрос экспериментальными средствами представляется разумным сопоставить характеристики излучения двух геометрически подобных крыльев, изготовленных из материалов с существенно различными механическими свойствами.

Если при этом характеристики излучения окажутся близкими, то вклад вибраций кромки несуществен: крылья излучают практически так же, как гипотетическое крыло бесконечной жесткости. При значительном отличии харак-

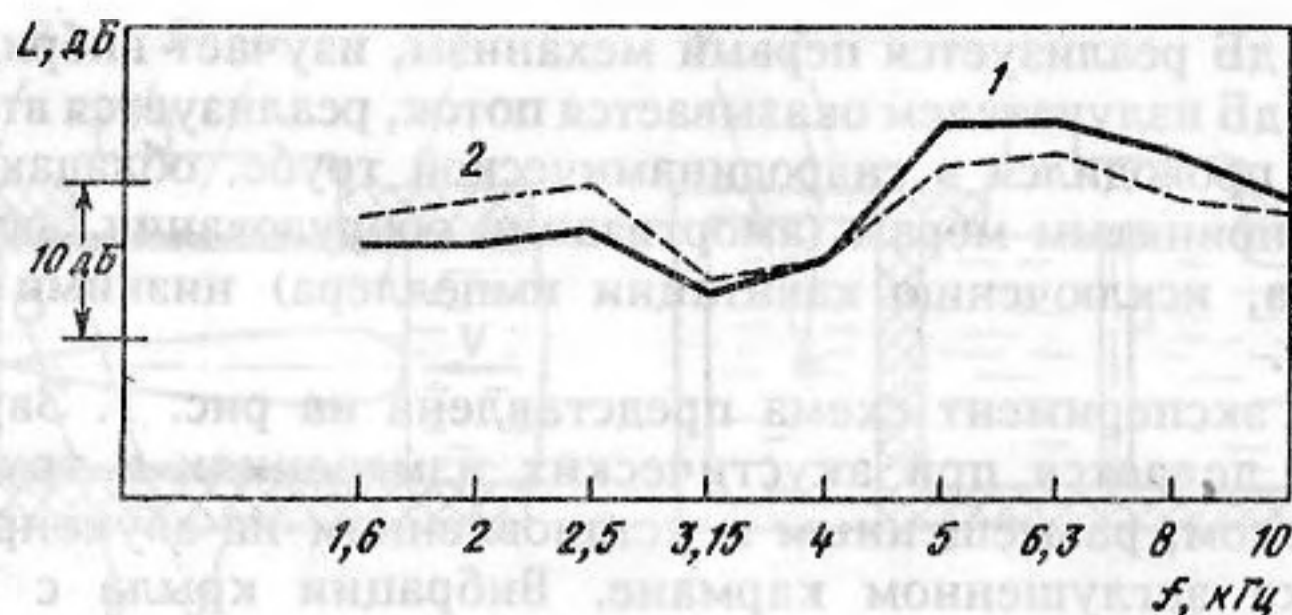


Рис. 3. Третьооктавные спектры излучения крыльев, изготовленных из различных материалов. Скорость потока $V = 15$ м/с. 1 — латунное крыло, 2 — капролоновое крыло, f — частота, L — спектральные уровни

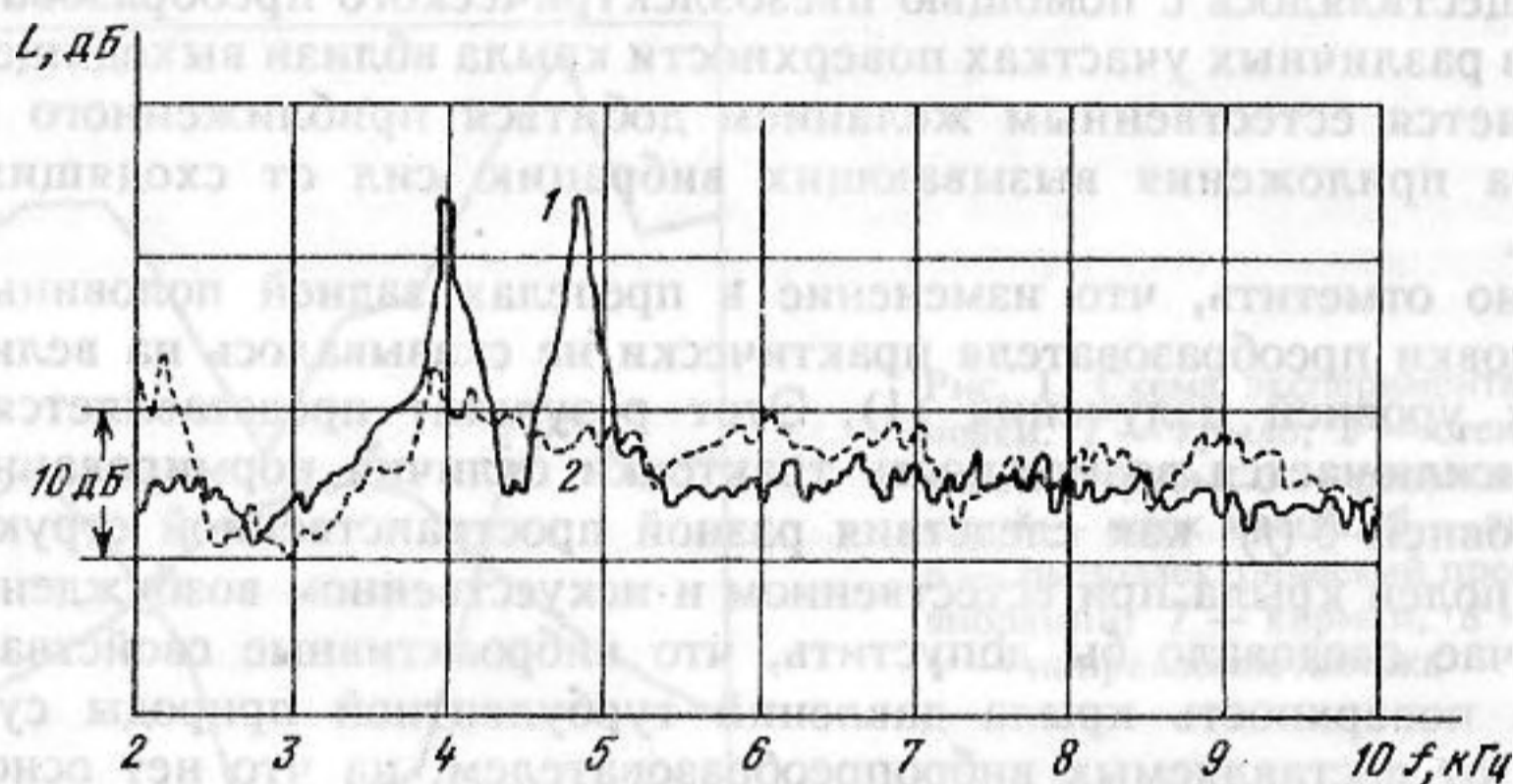


Рис. 4. Узкополосные спектры излучения крыльев. Обозначения те же, что на рис. 3

теристик излучения, наоборот, вклад вибраций оказывается определяющим, и тогда нужный ответ с помощью описанного эксперимента получить не удастся.

Следуя приведенной логике, дополнительно к латунному крылу, испытывавшемуся в естественных условиях и при искусственном возбуждении вибраций, было испытано геометрически эквивалентное крыло, изготовленное из капролона — полимерного материала с большими внутренними потерями. Как обычно, влияние потерь на уровни вибраций особенно велико в районе резонансов, поэтому логично предположить, что уровни вибраций капролонового крыла должны существенно уменьшиться на тех модах колебаний, для которых резонансы латунного крыла наиболее выражены, если, конечно, таковые имеются и проявляют себя в спектральных характеристиках излучения.

На рис. 3, 4 представлены соответственно третьооктавные и узкополосные ($\Delta f = 25$ Гц) спектры шума латунного и капролонового крыльев, испытанных в одинаковых условиях: при нулевом угле атаки и скорости натекающего потока $V = 15$ м/с.

Из сопоставления третьооктавных спектров излучения видно, что разница спектральных уровней незначительна. Она не превосходит 3 дБ, что не на много больше обычной для акустических измерений погрешности, как правило, составляющей $1,5 \div 2$ дБ. Следовательно, зарегистрированные третьооктавные спектральные уровни должны приблизительно соответствовать этой характеристике кромочного шума.

Принципиально иная картина возникает при сопоставлении узкополосных спектров: хорошо видно, что наблюдается существенное (на $12 \div 15$ дБ) снижение уровней излучения капролонового крыла в сравнении с латунным на частотах

$f_1 \approx 4$ кГц и $f_2 \approx 4,8$ кГц, соответствующих положению спектральных максимумов излучения латунного крыла. Важно отметить, что частоты спектральных максимумов не изменяются при изменении скорости натекающего потока, т. е. не зависят от числа Струхала. Это однозначно свидетельствует о том, что происхождение указанных максимумов действительно обусловлено вибрацией крыла на собственных частотах.

За исключением этих частот, во всем остальном обследованном диапазоне их изменения узкополосные спектральные уровни излучения обоих крыльев, как и третьоктавные, оказываются весьма близкими. Небольшая разница, $3 \div 4$ дБ, может объясниться неизбежными, в пределах допусков на изготовление, отклонениями в геометрии крыльев и небольшими изменениями условий испытаний. Кроме того, нужно учитывать, что при переходе от латунного к капролоновому крылу помимо коэффициента внутренних потерь существенно изменяются модуль Юнга и массовая плотность материала, поэтому абсолютные значения частот одних и тех же мод колебаний крыльев различны. Следовательно, вклад вибраций кромки в результирующее излучение происходит у обоих крыльев на разных частотах. Этим обстоятельством может объясняться аномальное (до 6 дБ) превышение уровней излучения капролонового крыла на частоте 2 кГц.

Таким образом, результаты как третьоктавного, так и узкополосного анализа показывают, что вне частот спектральных максимумов латунного крыла, $f_1 \approx 4$ кГц и $f_2 \approx 4,8$ кГц, влияние вибраций выходящей кромки на интенсивность кромочного шума несущественно. Очевидно, что этот вывод относится лишь к обследованным крыльям с их геометрическими и жесткостными характеристиками.

Лопастные гребных винтов, турбин и осевых насосов представляют собой консолюно закрепленные на ступице крылья сложной формы в плане, имеющие кривую и переменную вдоль радиуса толщину цилиндрических сечений, что существенно снижает их жесткость. Можно ожидать, что вследствие этого сделанный на основании описанного эксперимента с плоскими крыльями вывод о несущественном влиянии вибраций кромки на кромочный шум применительно к лопастным механизмам окажется непригодным.

С целью установления в этом случае вклада вибраций кромки были выполнены сравнительные измерения шума двух геометрически подобных моделей гребного винта, изготовленных из баббита и капролона. Методика эксперимента была аналогичной описанной выше, применявшейся при изучении шума крыльев.

Опыт проводился в гидродинамической трубе, также обладающей низкими уровнями собственных шумов, приспособленной для испытания моделей винтов диаметром $D = 0,2$ м. Спектральные уровни шума регистрировались при различных значениях частоты вращения модели, $10 \text{ об/с} \leq n \leq 35 \text{ об/с}$. При этом скорость натекающего на модель винта потока V была переменной и выбиралась из условия сохранения постоянной рабочей поступи, $J = V/nD$, являющейся основным параметром моделирования режима работы винта.

Третьоктавные и узкополосные ($\Delta f = 50$ Гц) спектры шума при частоте вращения моделей $n = 23$ об/с представлены на рис. 5 и 6 соответственно. Как видим, в отличие от крыла разница третьоктавных спектральных уровней оказывается существенной, достигая на отдельных частотах 8—10 дБ. Следовательно, проделанный эксперимент не позволяет установить вклад в излучение составляющей, обусловленной вибрацией кромки. Однако это не означает, что результаты эксперимента не содержат полезной информации.

Сопоставление узкополосных спектров шума латунного крыла и бабитового винта, представленных на рис. 4 и 6, указывает на их хорошее качественное соответствие в отношении наличия выраженных спектральных максимумов. При этом, так же как и у крыла, при изменении скорости натекающего потока V , а значит, и частоты вращения винта n , следующем из условия $J = \text{const}$, значение частот, соответствующих положению спектральных максимумов, сохраняется

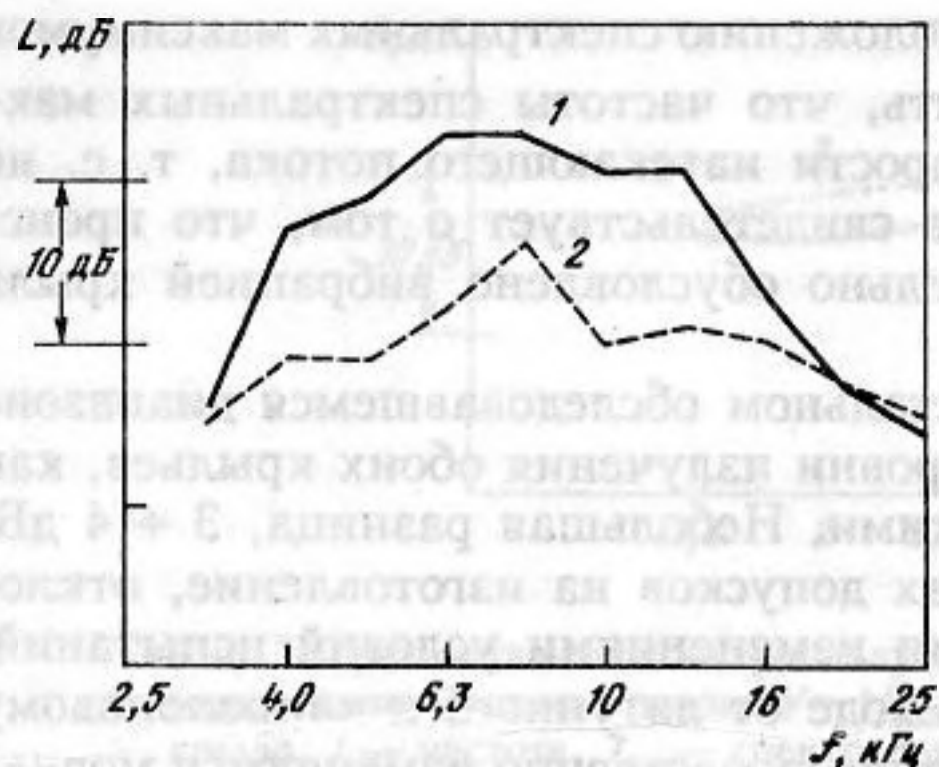


Рис. 5

Рис. 5. Третьооктавные спектры излучения моделей винтов, изготовленных из различных материалов. Частота вращения винта $n = 28$ об/с. 1 — баббитовый винт, 2 — капролоновый винт, f — частота, L — спектральные уровни

Рис. 6. Узкополосные спектры излучения моделей винтов. Обозначения те же, что на рис. 5

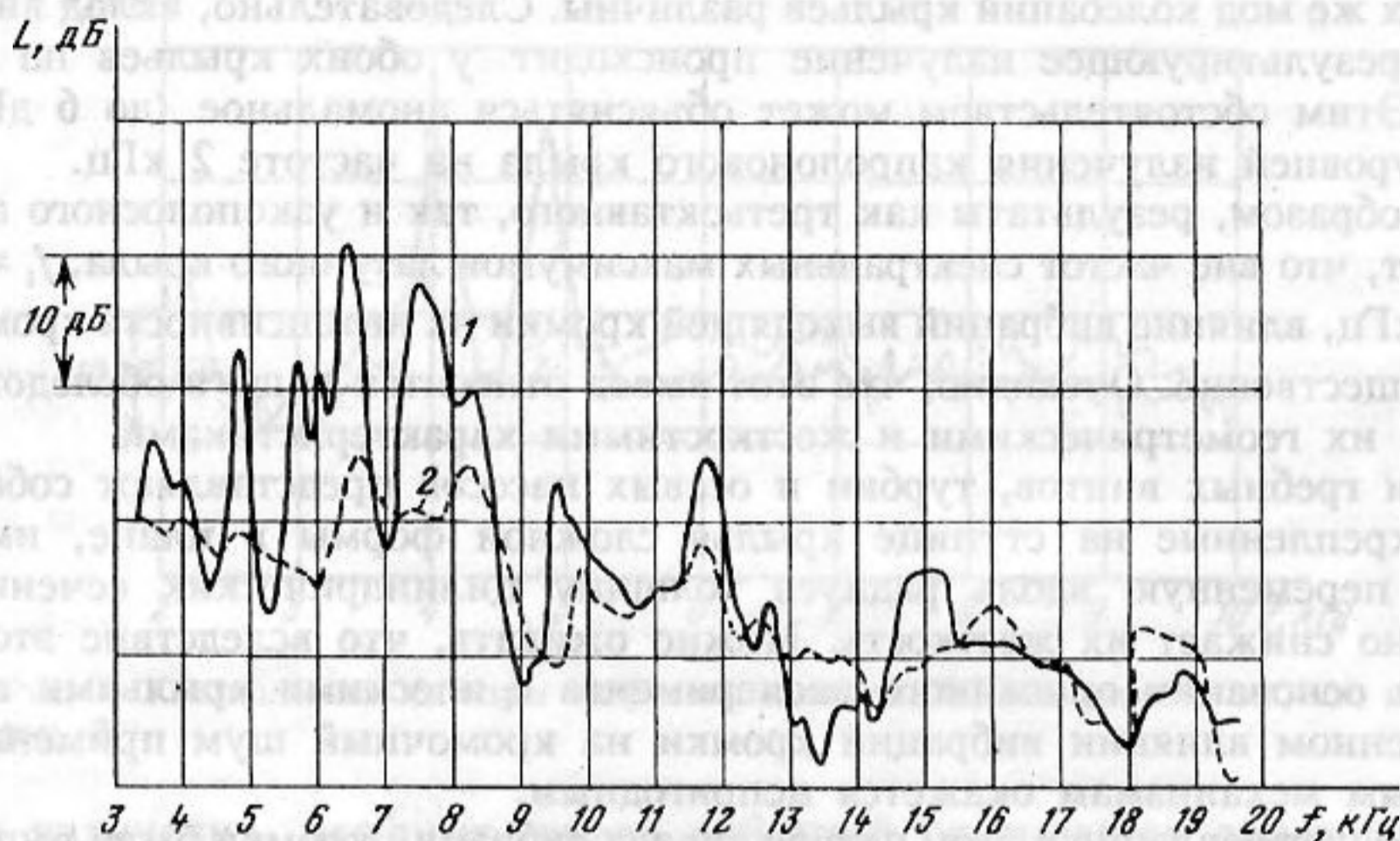


Рис. 6

неизменным. Количественное отличие состоит в существенно большем числе выраженных спектральных максимумов. Это и понятно, так как лопасть винта представляет собой крыло существенно более сложной конструкции и, следовательно, число мод собственных колебаний в фиксированном частотном диапазоне у лопасти оказывается значительно больше, чем у плоского крыла.

Сопоставление узкополосных спектров излучения капролоновых моделей свидетельствует, что так же, как и у крыла, происходит сглаживание спектральных максимумов. Однако это сглаживание менее ярко выражено: вклад излучения, обусловленного вибрацией кромки лопасти, достаточно велик, что и является причиной отмечавшейся выше невозможности его количественной оценки.

Представляет интерес изменение уровней спектральных максимумов при изменении частоты вращения баббитовой модели.

На рис. 7 представлены результаты соответствующего анализа. Хорошо видно, что закономерность изменения уровней спектральных максимумов оказывается разной: низкочастотные максимумы ($f = 4,25; 5,15; 6,05; 6,8$ кГц) в отличие от высокочастотных ($f = 7,9; 10,0; 15,5$ кГц) имеют тенденцию к насыщению. Увеличение частоты вращения модели не приводит к росту уровней и даже наблюдается тенденция к их уменьшению. В этом легко усмотреть аналогию с процессом изменения уровней дискрет при пении.

При достижении определенного значения частоты вращения гребного винта или рабочего органа другого лопастного механизма в отдельных случаях возникает

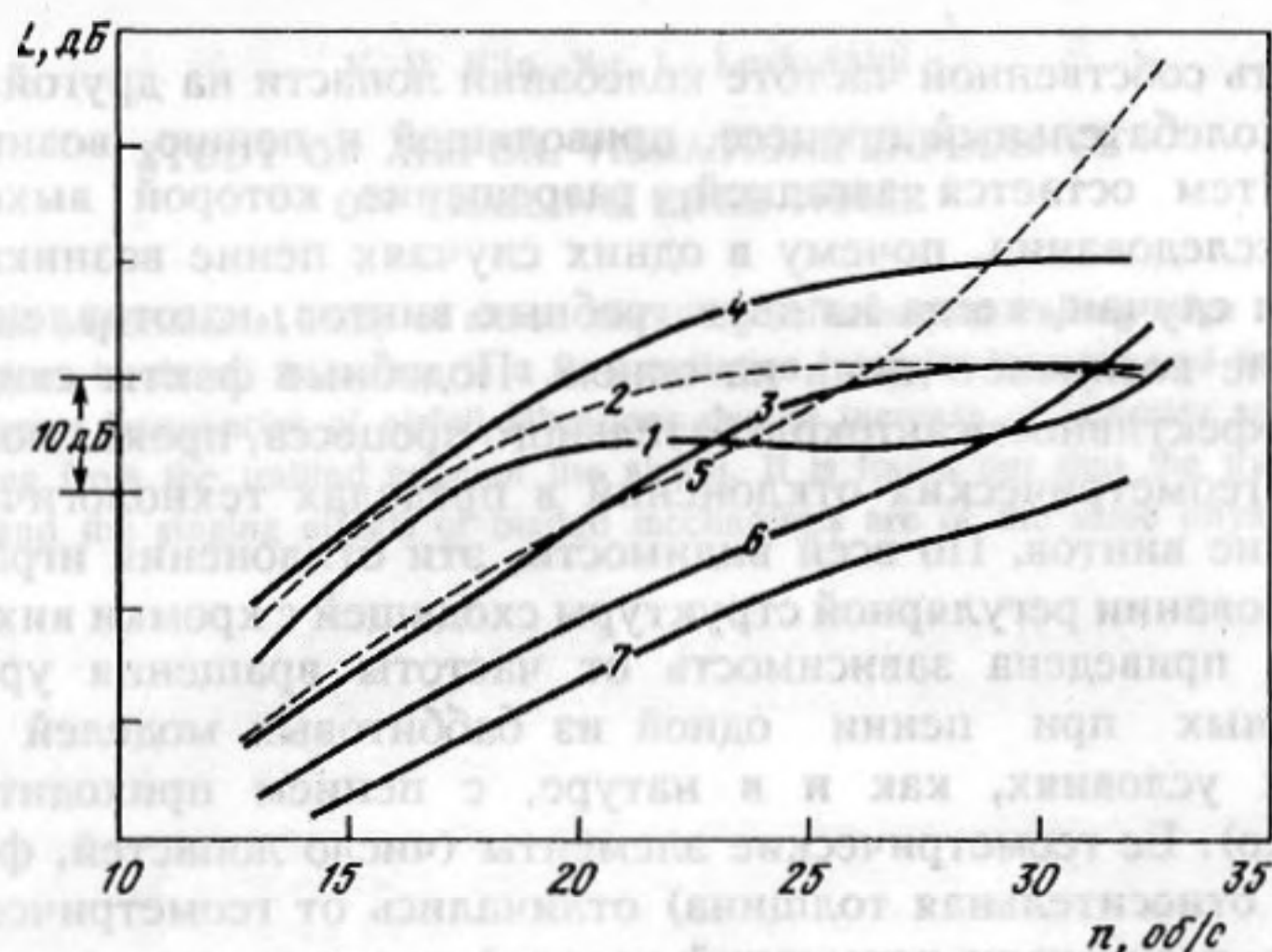


Рис. 7. Зависимость уровней спектральных максимумов L от частоты вращения модели гребного винта. Частота спектральных максимумов f_p , кГц: 1 — 4,25; 2 — 5,15; 3 — 6,05; 4 — 6,8; 5 — 7,9; 6 — 10,0; 7 — 15,5

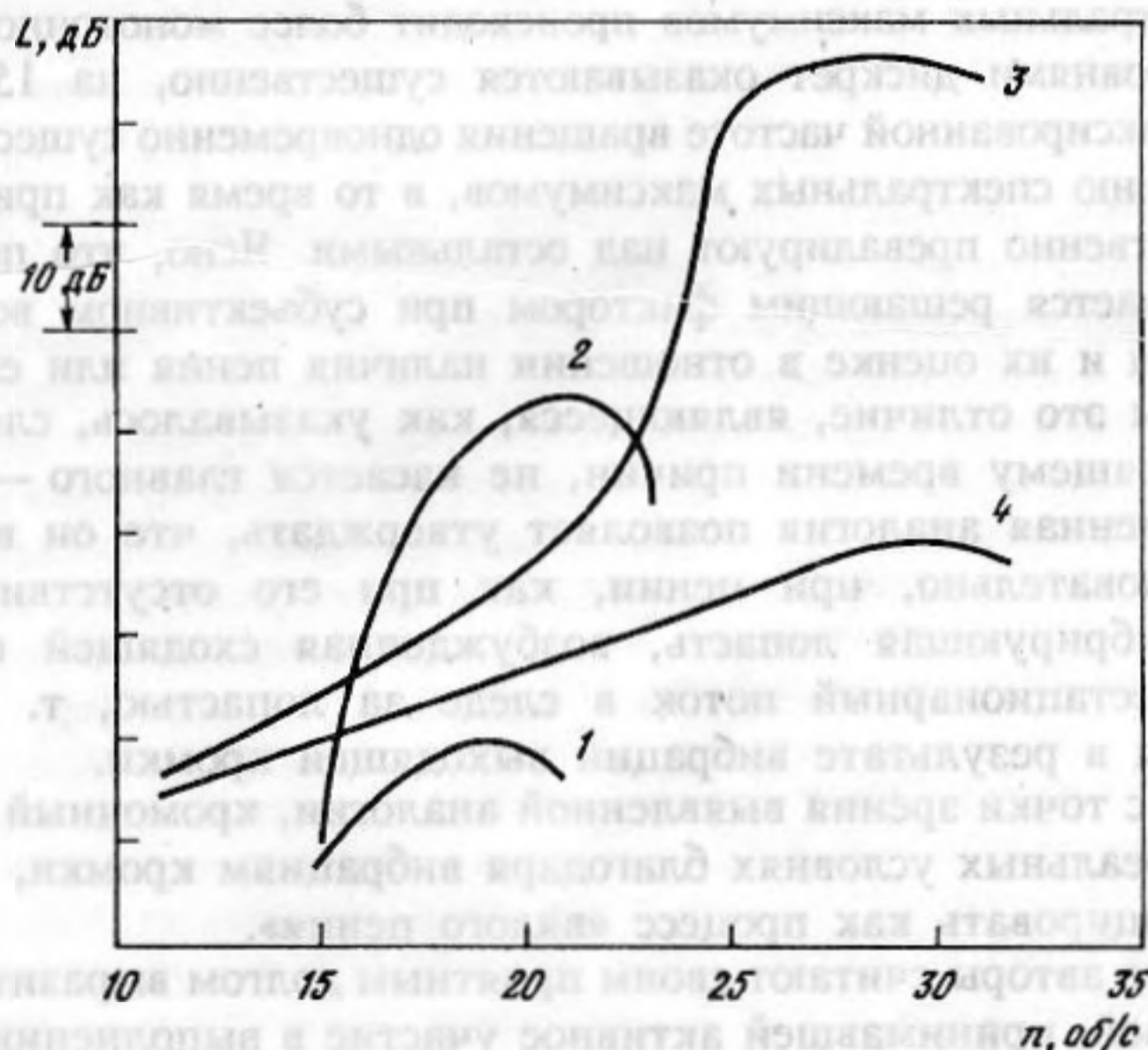


Рис. 8. Зависимость уровней дискрет L от частоты вращения при пении винта. Частота дискрет f_p , кГц: 1 — 2,2; 2 — 2,65; 3 — 4,05; 4 — 7,7

тональное излучение в звуковом диапазоне частот. При увеличении частоты вращения излучение прекращается, а затем вновь возникает, но уже на другой более высокой частоте. Физическая причина пения была установлена достаточно давно [5]. Совпадение характерной частоты схода регулярной дорожки вихрей с задней кромки лопасти с собственной частотой ее колебаний на одной из мод приводит к резонансному усилению вибраций. При увеличении частоты вращения частота схода вихрей также увеличивается и поэтому частота воздействующей на кромку возмущающей силы перестает совпадать с собственной частотой колебаний лопасти на данной моде, что приводит к прекращению пения. Однако при дальнейшем увеличении частоты вращения частота схода вихрей начинает

соответствовать собственной частоте колебаний лопасти на другой, более высокой моде, и автоколебательный процесс, приводящей к пению, возникает снова.

Вместе с тем остается загадкой, разрешение которой выходит за рамки настоящего исследования, почему в одних случаях пение возникает, а в других нет. Известны случаи, когда из двух гребных винтов, изготовленных по одному чертежу, пение возникает лишь на одном. Подобные факты свидетельствуют о влиянии на эффективность автоколебательного процесса, проявляющегося в пении, очень малых геометрических отклонений в пределах технологических допусков на изготовление винтов. По всей видимости, эти отклонения играют решающую роль в формировании регулярной структуры сходящей с кромки вихревой дорожки.

На рис. 8 приведена зависимость от частоты вращения уровней дискрет, зафиксированных при пении одной из баббитовых моделей гребного винта (в модельных условиях, как и в натуре, с пением приходится встречаться довольно редко). Ее геометрические элементы (число лопастей, форма профилей сечений и их относительная толщина) отличались от геометрических элементов пары моделей, результаты испытаний которой представлены выше. Из сопоставления с данными, приведенными на рис. 7, хорошо видна декларированная выше качественная аналогия закономерностей изменения с частотой вращения уровней дискрет при пении и уровней спектральных максимумов при его отсутствии.

Отличие состоит лишь в том, что при отсутствии пения интенсивность нарастания и падения спектральных максимумов происходит более монотонно; сами уровни в сравнении с уровнями дискрет оказываются существенно, на 15—20 дБ, ниже; наконец, при фиксированной частоте вращения одновременно существует множество близких по уровню спектральных максимумов, в то время как при пении одна-две дискреты существенно превалируют над остальными. Ясно, что последнее обстоятельство оказывается решающим фактором при субъективном восприятии обоих типов излучения и их оценке в отношении наличия пения или его отсутствия.

Вместе с тем это отличие, являющееся, как указывалось, следствием неизученных к настоящему времени причин, не касается главного — механизма излучения. Выявленная аналогия позволяет утверждать, что он в обоих случаях одинаков. Следовательно, при пении, как при его отсутствии, излучателем является не вибрирующая лопасть, возбужденная сходящей с нее вихревой дорожкой, а нестационарный поток в следе за лопастью, т. е. сами вихри, формирующиеся в результате вибраций выходящей кромки.

Кроме того, с точки зрения выявленной аналогии, кромочный шум лопастных механизмов в реальных условиях благодаря вибрациям кромки, образно говоря, можно квалифицировать как процесс «вялого пения».

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Г. Я. Барабановой, принимавшей активное участие в выполнении экспериментов и обработке их результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдин Е. Я. Исследование шума вентиляторных установок и методов борьбы с ним // Тр. ЦАГИ. Вып. 713. М.: Оборонгиз, 1958.
2. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды. 2-е изд. М.: Наука, 1981.
3. Flowcs-Williams J. E., Hall L. H. Aerodynamics sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering haft-plane // J. Fluid Meth. 1970. V. 40. № 4. P. 657—680.
4. Blake W. K. et al. Hydroelastic variables influencing propeller and hydrofoil singing // ASME Symposium on Noise and Fluid Engineering. Winter Meeting. Nov. 1977.
5. Кривцов Ю. В., Перник А. Д. Пение гребных винтов // Л.: Судостроение, 1957. № 10. С. 9—14.

Центральный научно-исследовательский институт им. Крылова

Поступила в редакцию
13.11.91

После исправления
14.10.92.

STUDY OF AIRFOIL VIBRATIONS INFLUENCE ON TRAILING EDGE NOISE

ЭЭМ 39

The results of an experimental study of airfoil vibrations influence on trailing edge noise are presented. The effect of vibrations is shown to reduce to a flow radiation intensity increase and to a rise of spectrum maxima at the inherent frequencies of airfoil vibrations due to increase of intensity and to regularization of vortices separating from the trailing edge of the airfoil. It is found out that the trailing edge noise of a vibrating airfoil and the singing effects of bladed mechanisms are of the same physical nature.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

В работе описывается процесс распространения слабых ударных волн в неоднородной среде. Показано, что в неоднородной среде ударные волны распространяются с учетом рефракции и дифракции. Показано, что в неоднородной среде ударные волны распространяются с учетом рефракции и дифракции. Показано, что в неоднородной среде ударные волны распространяются с учетом рефракции и дифракции.

Физика процесса распространения слабых ударных волн (СВ) в неоднородной среде описывается уравнением (1). В неоднородной среде ударные волны распространяются с учетом рефракции и дифракции. Показано, что в неоднородной среде ударные волны распространяются с учетом рефракции и дифракции.

Из (5) можно заметить, что коэффициент затухания (K) от частоты (f) зависит также от вязкости (nu) и от неоднородности среды. Это обстоятельство определяет различие свойств неоднородной среды от однородной в отношении длины волны от полученных в однородной среде. Проанализируем полученное уравнение. Прежде всего заметим, что в случае неоднородности по оси z, оно переходит в уравнение (6) для однородной атмосферы и даже для плоской волны — в уравнение (7).

В работе [1] на основе уравнения Бюргера показано, что площадь S огибающей акустической волны зависит от частоты (f) и от неоднородности среды. Показано, что в неоднородной среде ударные волны распространяются с учетом рефракции и дифракции.

Длина волны (lambda) зависит от частоты (f) и от неоднородности среды. Показано, что в неоднородной среде ударные волны распространяются с учетом рефракции и дифракции.