DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-150-156
УДК 629.5.015.6+534.83.001.18

А.С. Суворов, П.С. Кальясов, П.И. Коротин, Е.М. Соков, В.В. Артельный
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

ПРОГНОЗ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ ОТ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ОБТЕКАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Объект и цель научной работы. Численное прогнозирование характеристик гидродинамического шума, возникающего при взаимодействии потока с неоднородностями обтекаемой поверхности.
Материалы и методы. Задача решается с использованием гибридных методов численного моделирования турбулентности и прямого моделирования рассеяния псевдозвукового поля квадрупольных источников.
Основные результаты. Выполнен анализ характеристик направленности и интенсивности шумоизлучения, предложена физическая интерпретация протекающих процессов, продемонстрирована автомодельность акустических характеристик для различных режимов течения.
Заключение. Результаты работы могут быть использованы в акустическом проектировании малошумного гидравлического оборудования.
Ключевые слова: вычислительная акустика, гидродинамический шум, конечно-элементное моделирование, гибридная модель турбулентности.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-150-156
UDC 629.5.015.6+534.83.001.18

A. Suvorov, P. Kalyasov, P. Korotin, Ye. Sokov, V. Artelny
RAS Insitute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, Russia

PREDICTION OF NOISE RADIATION FROM NON-UNIFORMITIES OF SURFACE IN FLOW

Object and purpose of research. Numerical prediction of hydrodynamic noise induced by flow interaction with non-uniformities of a surface.
Materials and methods. The problem is solved by means of hybrid numerical simulation methods for turbulence and direct simulation methods for pseudo-acoustic field dissipation of four-pole sources.
Main results. Analysis of noise radiation direction and intensity, physical interpretation of the processes taking place in this phenomenon, demonstration of the possibility to directly apply acoustic test data to various flow patterns.
Conclusion. The results of this work could be used in acoustic design of silent hydraulic equipment.
Keywords: computational acoustics, flow noise, FEM-based simulation, hybrid turbulence model.
Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Введение
Introduction

Расчет гидродинамического шума (ГДШ), возникающего на неоднородностях поверхности движущихся в жидкости тел (отверстиях, концевых кромках, выступах и т.д.), представляет отдельный класс задач вычислительной акустики [1]. Сложность решения таких задач обусловлена необходимостью воспроизведения турбулентных возмущений в пограничном слое (ПС), который взаимодействует с исследуемой неоднородностью. При этом необхо-

Для цитирования: Суворов А.С., Кальясов П.С., Коротин П.И., Соков Е.М., Артельный В.В. Прогноз шумоизлучения от неоднородностей обтекаемой поверхности. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 3(389): 150–156.
For citations: Suvorov A., Kalyasov P., Korotin P., Sokov Ye., Artelny V. Prediction of noise radiation from non-uniformities of surface in flow. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 3(389): 150–156 (in Russian).

димо либо полностью моделировать эволюцию и динамику вихрей во всех предшествующих неоднородностях ПС, либо синтезировать «псевдотурбулентность» на допустимом удалении от неоднородности с последующим расчетом в пределах компактной гидродинамической области [2–4]. Первый подход практически неприменим для большинства ситуаций, поскольку моделирование турбулентности в вихреразрешающей (LES) постановке на всей длине ПС на обтекаемой поверхности требует огромных вычислительных затрат. Такая задача имеет размерность порядка нескольких миллиардов степеней свободы. Второй, «гибридный» подход, основанный на моделировании турбулентности в RANS-LES постановке, в настоящее время получил широкое распространение [5, 6].

Вместе с тем гибридный подход плохо сочетается с традиционным способом пересчета, например, гидродинамического поля в акустическое излучение [7]. Во-первых, для известного метода (FW-H) необходима информация о распределении звукового давления на контрольной поверхности, охватывающей обтекаемое тело целиком, без возможности выделения компактной гидродинамической области в окрестности исследуемой неоднородности. Во-вторых, формирующиеся на границе RANS-LES интерфейсов нефизичные псевдотурбулентные источники кардинально искажают поле давления на поверхности обтекаемого тела, что приводит к критической потере точности в расчете шумоизлучения [2]. Более того, метод FW-H базируется на использовании функции Грина свободного пространства, что не позволяет смоделировать распространение звука в реальных системах с произвольной геометрической конфигурацией.

Авторами в [8] предложен и исследован оригинальный метод численного моделирования ГДШ, который базируется на прямом решении задачи акустического рассеяния псевдозвукового поля квадрупольных источников (напряжений Лайтхилла) на упругой поверхности. Данный метод создан в интересах решения задач моделирования шумоизлучения неоднородностей обтекаемых тел и позволяет пространственно отфильтровать нефизичные псевдотурбулентные источники в области RANS-LES перехода, а нужные (напряжения Лайтхилла) – интерполировать в виде квадруполей из гидродинамической модели (ГМ) в акустическую конечно-элементную модель (АКМ). При этом не требуется информация о давлении на контрольной поверхности, а произвольная геометрия и упругие характеристики излучающего тела воссоздаются непосредственно с помощью АКМ в конечно-элементной (КЭ) постановке. Задача прогнозирования шума, в приближении отсутствия обратного влияния упругих колебаний на поток, разбивается на две, которые решаются последовательно. В первую очередь выполняется гидродинамическое моделирование – расчет динамики акустических источников вблизи неоднородности с использованием вихреразрешающей численной ГМ. Затем данные источники интерполируются на КЭ сетку АКМ, позволяющую реализовать вычисления дальних акустических полей с учетом произвольной геометрии излучающего звук обтекаемого тела и, при необходимости, учитывая усиление звука за счет резонансных эффектов.

В данной работе приведен пример апробации метода в задаче шумоизлучения системы технологических углублений вытянутой формы в обтекателе гидравлического изделия. На рис. 1 показано схематичное изображение углублений на поверхности тела, обтекаемого потоком. Для расчетов выбраны скорости U_0 = 2,5 м/с и U_0 = 7 м/с.

Описание соответствующих численных моделей приведено ниже. Для проведения гидродинамических расчетов использовано ПО ANSYS CFX.

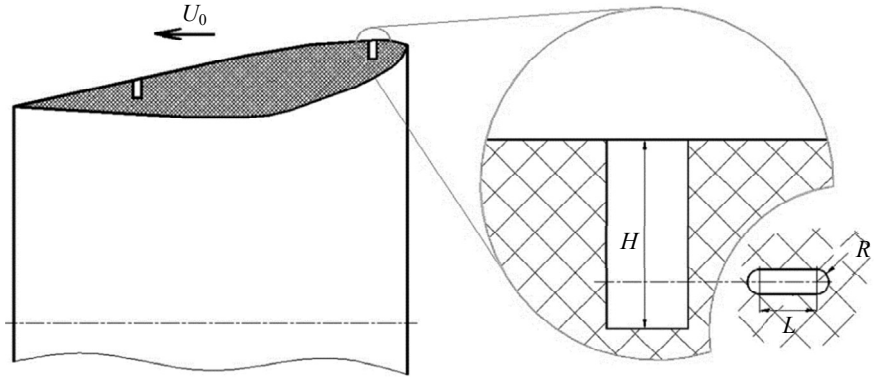


Рис. 1. Эскиз отверстия на обтекателе

Fig. 1. Sketch of a hole on fairing

Интерполяция источников на сетку акустической модели осуществляется с помощью модуля ПО «CATEC», разрабатываемого в ИПФ РАН, акустические расчеты проводились в ПО «АСТРА» (разработка ИПФ РАН).

Описание гидродинамической и акустической численных моделей

Description of the hydrodynamic and the acoustic numerical model

Для проведения гидродинамических расчетов в рамках гибридного RANS-LES подхода необходимы две ГМ.

Назначение первой ГМ RANS-модели – расчет усредненных характеристик ПС на всей длине обтекателя до неоднородности в целях определения начальных и граничных условий (осредненные профили скорости, энергии и диссипации турбулентных пульсаций) для последующего LES-расчета и определение толщины ПС в районе неоднородности в целях оптимизации сетки. В ГМ для замыкания уравнений движения жидкости используется SST-модель турбулентности Ментера [2]. Сетка ГМ содержит 0,8 млн ячеек. Результаты моделирования показывают, что в рассматриваемом случае толщина пограничного слоя для ближайшего к носовой кромке обтекателя отверстия составляет около 10 мм. На основе этих данных строится вихреразрешающая ГМ, реализующая WMLES-модель турбулентности на базе SST-модели Ментера (рис. 2).

ГМ учитывает следующие граничные условия: условие прилипания и непротекания на поверхности обтекателя (1); условия непротекания на боковых границах расчетной области (2); рассчитанные ранее поля скорости, кинетической энергии и диссипации турбулентности на входной границе (3); нулевое среднее избыточное давление на выходной границе (4). Размеры расчетной области составляют 4,5L (рис. 1) в направлении потока и 1,7L поперек потока. Размер области в направлении нормали к обшивке обтекателя равен 0,5L, что соответствует 3δ, где δ – толщина ПС в районе углубления.

Сетка ГМ включает в себя 4 млн ячеек в виде параллелепипедов. В соответствии с изложенными в [4] рекомендациями размеры ячеек составляют не более δ/10 в направлении течения и δ/20 в направлении поперек потока. В направлении нормали к поверхности на толщину пограничного слоя приходится 35–45 ячеек. Величина Y^+, характеризующая безразмерное значение удаления ближайшего к поверхности обтекателя узла, в среднем составляет $Y^+ = 0{,}6$ для $U_0 = 2{,}5$ м/с и $Y^+ = 1{,}5$ для $U_0 = 7$ м/с. Максимальное значение Y^+ достигается локально в районе кромки углубления и не превышает $Y^+ = 3$. Расчеты выполняются с временным шагом 0,1 мс, при этом среднее число Куранта характеризуется значением $CFL = 0{,}4$ для $U_0 = 2{,}5$ м/с и $CFL = 0{,}86$ для $U_0 = 7$ м/с. В интересах упрощения последующего расчета шумоизлучения временные и пространственные параметры дискретизации не меняются для рассматриваемых скоростей. Расчеты выполняются при активированной центральной разностной схеме по пространству с использованием неявной схемы интегрирования по времени второго порядка (для уравнений переноса массы и импульса) и первого порядка (для подсеточных турбулентных характеристик) [3, 4].

С использованием ГМ была рассчитана временная реализация тензора напряжений Лайтхилла длительностью 1 с (для каждой скорости – 10 тыс. временных шагов, по 2 промежуточных итерации на временной шаг). Гидродинамические расчеты выполнялись на кластере производительностью 600 ГФлопс и заняли в общей сложности около 7 рабочих дней.

Для проведения акустических расчетов была использована АКМ, описывающая сжимаемую жидкость, которая окружает обтекатель (рис. 3).

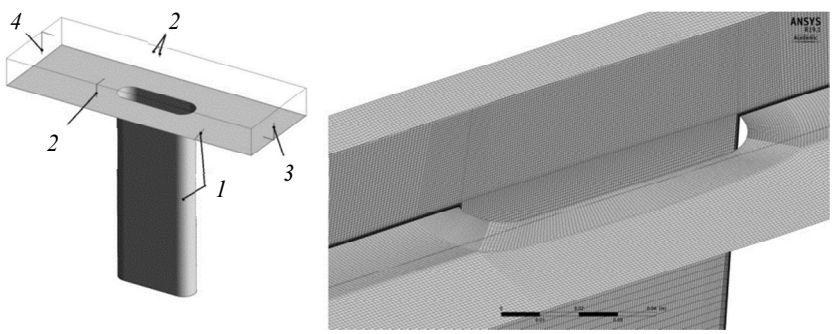


Рис. 2. Границы и сетка гидродинамической модели для вихреразрешающих расчетов

Fig. 2. Boundaries and mesh of hydrodynamic model for vortex-resolution calculations

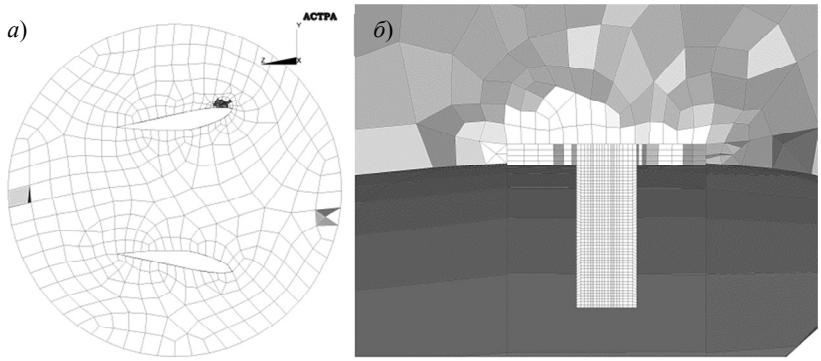


Рис. 3. Акустическая конечно-элементная модель жидкости, окружающей обтекатель (*а*), и ее фрагмент в окрестности неоднородности (*б*)

Fig. 3. *a*) finite-element acoustic model of the fluid around the fairing; *b*) its fragment near the non-uniformity

Внешняя граница расчетной области представляет собой сферу радиусом 5 м, на границе которой в 3170 узлах реализуются специальные граничные условия поглощения акустических волн. Так же данная граница используется для вычисления дальнего акустического поля. АКМ состоит из 29 тыс. квадратичных акустических КЭ, описывающих 93 тыс. степеней свободы. При этом фрагмент АКМ, в котором осуществляется интерполяция напряжений Лайтхилла (рис. 4, справа), состоит из 12 тыс. элементов.

Результаты численного моделирования

Numerical simulation results

Результаты расчетов ГМ для фиксированного момента времени при скорости $U_0 = 2{,}5$ м/с представлены на рис. 4–5 (см. вклейку). На рис. 4 приведена мгновенная пространственная картина течения. Наблюдается периодическая генерация вихрей на передней кромке отверстия и движение вихрей вдоль течения с их расщеплением на хаотические мелкомасштабные структуры. Крупные вихри формируются в соответствии с известной гипотезой неустойчивости вихревой пелены, которая реализуется на скачке продольной скорости между внешним пространством и полостью отверстия. Формирование более мелкомасштабных структур соответствует гипотезе Колмогорова [9].

Расчеты показывают, что формирующиеся крупномасштабные вихри имеют одинаковую направленность и период, характеризующийся числом Струхаля $St \approx 0{,}3$ (относительно размера L, рис. 1). Внутри углубления формируется крупномасштабный квазистационарный вихрь, приводящий к медленному вращению жидкости, что соответствует классической картине застойного течения в каверне.

На рис. 5 представлено поле монопольных источников звука, полученных двукратным дифференцированием тензора Лайтхилла по пространству. Данные источники формируют правую часть уравнения Гельмгольца в задаче шумоизлучения [10]. Важно отметить, что суммарно величина этих источников должна быть равна нулю, т.к. в целом поле гидродинамических возмущений является псевдозвуковым. Однако для исключения различных численных ошибок и нефизичных процессов на входной и выходной границах ГМ интерполяция этих источников в АКМ осуществляется не напрямую, а с использованием квадрупольной интерпретации, описанной в [8].

Интерполяция квадруполей в АМ позволяет рассчитать псевдозвуковое поле гидродинамических давлений и отраженные поверхностью насадки звуковые волны, т.е. спрогнозировать дальнее акустическое поле. Источником гидродинамического шума в дальнем поле является переменная сила, возникающая при взаимодействии вихрей с задней стенкой отверстия. Данная переменная сила имеет ориентацию вдоль скорости потока, что определяет направленность излучения.

На рис. 6 (см. вклейку) представлен результат решения акустической задачи – максимальная величина звукового давления на линии, отстоящей от оси обтекателя на стандартное расстояние для двух скоростей течения. Данная линия лежит в плоскости симметрии отверстия на обтекателе и находится в его «прямой видимости». Таким образом, рис. 6 дает «проходную» характеристику шума и характеризует максимально возможный уровень в системе координат, связанной с течением, при проходе обтекаемого тела.

Анализируя график рис. 6, можно отметить, что на амплитудно-частотных характеристиках выделяются максимумы, соответствующие первой, второй и четвертой временным гармоникам процесса

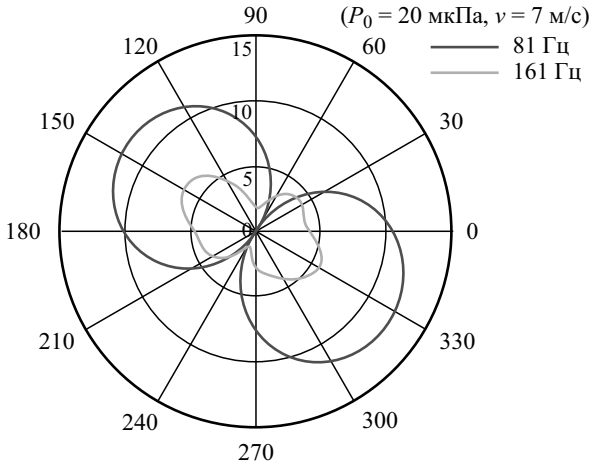


Рис. 8. Усредненные в 1/3-октаве диаграммы направленности излучения в плоскости симметрии углубления для второй и четвертой гармоник гидродинамического процесса (180° соответствует направлению вектора U_0). Диаграммы приведены к дистанции 50 м и отнормированы на величину 20 мкПа

Fig. 8. 1/3-octave averaged directional patterns of noise radiation in the symmetry plane of the dent for the 2nd and the 4th harmonics of hydrodynamic process (180° corresponds to direction of vector U0). The diagrams are brought to the distance of 50 m and the pressure of 20 μPa

срыва крупных вихрей. Для скорости 7 м/с эти частоты равны 42, 88 и 173 Гц. Максимальный уровень имеет вторая гармоника: величина звукового давления в 1/3-октаве 81 Гц составляет 30 дБ для скорости 7 м/с и 3 дБ в 1/3-октаве 32 Гц для 2,5 м/с.

Уровень излучения снижается с ростом частоты, начиная от второй гармоники срыва вихрей. Максимум шума на второй гармонике процесса указывает на отсутствие симметрии временной реализации переменной силы, действующей на поверхность.

Продолжая анализ результатов, осуществим их масштабирование по вертикальной оси – на величину U_0^2/U^2, и по горизонтальной – на U_0/U. Применяя данную операцию к кривой для $U = 2{,}5$ и совмещая графики в общих осях, получаем результат, приведенный на рис. 7 (см. вклейку).

Отмасштабированные кривые хорошо совпадают. Это свидетельствует об автомодельности процесса и возможности прогнозировать излучение для разных скоростей потока. Также это подтверждает тот факт, что частота осцилляций переменной силы пропорциональна числу Струхаля и определяется крупномасштабными вихрями.

На силовой характер излучения указывает дипольный характер диаграмм направленности (в плоскости проходной характеристики), приведенных на рис. 8.

Из рис. 8 следует, что в области максимума излучения характер излучения дипольный, при этом ориентация диполя определяется вектором скорости потока. В высокочастотной области форма диаграммы искажается эффектом экранирования обтекателя.

Пространственное распределение давления в ближнем поле, соответствующее двум указанным частотным полосам, приведено на рис. 9 (см. вклейку). Цветовая шкала рисунков линейная и соответствует уровню звукового давления.

Для оценки точности метода расчета шумоизлучения была решена аналогичная задача при условии отсутствия неоднородности (гладкая стенка обтекателя). В таких условиях отсутствует дипольный источник и излучение должно определяться взаимодействием гладкой поверхности и псевдозвукового поля в турбулентном ПС. Результаты сравнительных расчетов амплитудно-частотных характеристик звукового давления на скорости 2,5 м/с в исходной постановке и при отсутствии отверстия представлены на рис. 10 (см. вклейку). Дискретные составляющие для гладкой поверхности практически отсутствуют, а широкополосная составляющаяся излучения существенно снижается.

Выводы

Conclusions

С использованием разработанного в ИПФ РАН численного метода моделирования шумоизлучения решена задача прогнозирования ГДШ, вызванного взаимодействием потока с локальной неоднородностью в обшивке обтекателя. Метод пригоден для прогноза акустического излучения большинства типов неоднородностей, которые присутствуют на поверхности тел, движущихся в жидкости.

Для неоднородности в виде отверстия показано, что акустическое излучение определяется процессом периодического срыва вихрей с передней кромки и имеет дипольный характер, вызванный переменной силой, ориентированной вдоль потока. Уровень излучения пропорционален квадрату скорости потока, а частота срыва вихрей – скорости потока.

Результаты работы могут быть использованы в акустическом проектировании изделий с высокими требованиями к уровню шума.

Библиографический список

1. *Голубев А.Ю.* Особенности полей пульсаций давления в окрестности конфигураций «прямой уступ – обратный уступ» // Акустический журнал. 2018. Т. 6. № 1. С. 52–62.
2. *Гарбарук А.В.* и др. Современные подходы к моделированию турбулентности. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016.
3. *Снегирёв А.Ю.* Высокопроизводительные вычисления в технической физике Численное моделирование турбулентных течений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.
4. *Menter F.R.* Best practice: scale-resolving simulations in ANSYS CFD Ansys Germany GmbH. 2015. Ver. 2.
5. *Гарбарук А.В.*, *Спаларт Ф.Р.*, *Стрелец М.Х.*, *Шур М.Л.* Расчет аэродинамики шума при обтекании тандема цилиндров // Математическое моделирование. 2014. Т. 26. № 6. С. 119–136.
6. *Доронина О.А.*, *Бахвалов П.А.*, *Козубская Т.К.* Численное исследование динамики акустического вихря Рэнкина // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 4. С. 462–473.
7. *Fowcs-Williams J.E.*, *Hawkings D.L.* Sound generation by turbulence and surfaces in arbinary motion // Proc. Roy. Soc. London, 1969. A264: 321–342.
8. *Суворов А.С.*, *Коротин П.И.*, *Соков Е.М.* Метод конечно-элементного моделирования шумоизлучения, генерируемого неоднородностями тел, движущихся в турбулентном потоке жидкости // Акустический журнал. 2018. Т. 64. № 6. С. 756–767.
9. *Колмогоров А.Н.* Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // Доклад АН СССР. 1941. Т. 30. № 4. С. 299–303.
10. *Лайтхилл Дж.* Волны в жидкостях. М.: Мир, 1981.

References

1. *A. Golubev*. Specific features of pressure fluctuation fields in the vicinity of a forward-facing step – backward-facing step configuration // Acoustical Physics. 2018. Vol. 6. No. 1. P. 52–62 (*in Russian*).
2. *A. Garbaruk et al*. Modern approaches to simulation of turbulence. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State Polytechnical University, 2016 (*in Russian*).
3. *A. Snegirev*. High-performance calculations in applied physics. Numerical simulation of turbulent flows. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State Polytechnical University, 2009 (*in Russian*).
4. *Menter F.R.* Best practice: scale-resolving simulations in ANSYS CFD Ansys Germany GmbH. 2015. Ver. 2.
5. *A. Garbaruk*, *F. Spalart*, *M. Strelets*, *M. Shur*. Aerodynamic flow noise calculation for tandem cylinders // Mathematical Models & Computer Simulations. 2014. Vol. 26. No. 6. P. 119–136 (*in Russian*).
6. *O. Doronina*, *P. Bakhvalov*, *T. Kozubskaya*. Numerical study of acoustic radiation dynamics of a Rankine vortex // Acoustical Physics. 2016. Vol. 62. No. 4. P. 462–473 (*in Russian*).
7. *Fowcs-Williams J.E.*, *Hawkings D.L.* Sound generation by turbulence and surfaces in arbinary motion // Proc. Roy. Soc. London, 1969. A264: 321–342.
8. *A. Suvorov*, *P. Korotin, Ye. Sokov*. Finite-Element Method for Simulating Noise Emission Generated by Inhomogeneities of Bodies Moving in a Turbulent Fluid Flow // Acoustical Physics. 2018. Vol. 64. No. 6. P. 756–767 (*in Russian*).
9. *A. Kolmogorov*. Structure of a local turbulence in the incompressible fluid at very high Reynolds numbers // Message to the USSR Academy of Sciences. 1941. Vol. 30. No. 4. P. 299–303 (*in Russian*).
10. *J. Lighthill*. Waves in fluids. Moscow: Mir, 1981 (*Russian translation*).

Сведения об авторах

Суворов Анатолий Сергеевич, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией Института прикладной физики РАН. Адрес: 603950, Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46. Тел.: 8 (831) 416-47-85. E-mail: suvorov@hydro.appl.sci-nnov.ru.

Кальясов Павел Сергеевич, к.т.н., ведущий инженер Института прикладной физики РАН. Адрес: 603950, Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46. Тел.: 8 (831) 416-47-85. E-mail: pkalyasov@mail.ru.

Коротин Павел Иванович, к.ф.-м.н. заместитель директора по научной работе, руководитель Центра Гидроакустики, заведующий отделом физической акустики Института прикладной физики РАН. Адрес: 603950, Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46. Тел.: 8 (831) 416-06-30. E-mail: monitor@appl.sci-nnov.ru.

Соков Евгений Михайлович, ведущий программист Института прикладной физики РАН. Адрес: 603950, Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46. Тел.: 8 (831) 416-06-30. E-mail: evgeniy.sokov@ipfran.ru.

Артельный Виктор Васильевич, старший научный сотрудник Института прикладной физики РАН. Адрес: 603950, Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46. Тел.: 8 (831) 416-49-72.
E-mail: artel@hydro.appl.sci-nnov.ru.

About the authors

Anatoly S. Suvorov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, RAS Institute of Applied Physics. Address: 46, Ulyanova st., GSP-120, Nizhny Novgorod, Russia,

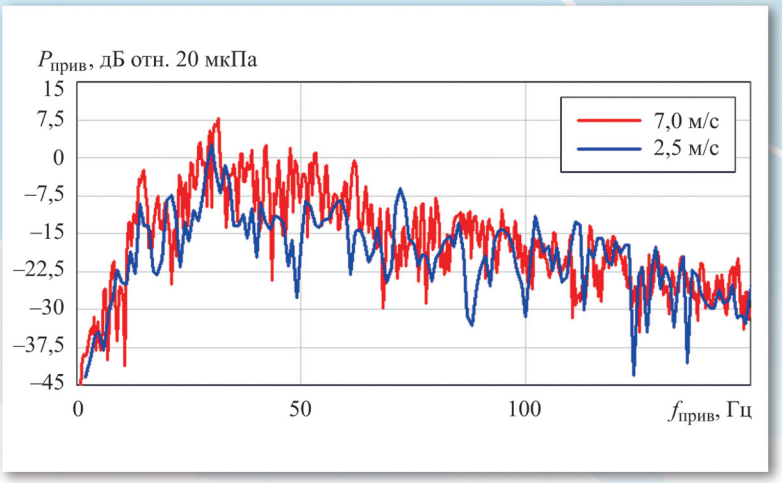
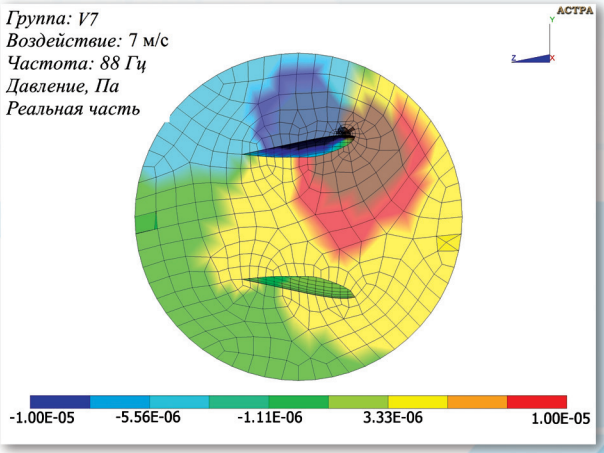
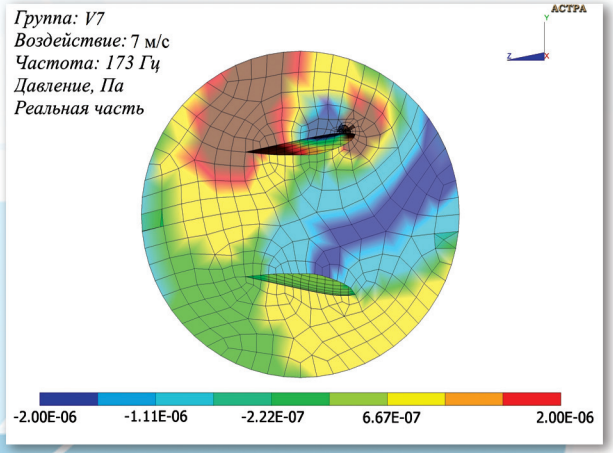


Рис. 7. Масштабированные амплитудно-частотные характеристики звукового давления

Fig. 7. Scaled amplitude & frequency parameters of acoustic pressure



а)



б)

Рис. 9. Распределение звукового давления на частотах второй (*а*) и четвертой (*б*) гармоник гидродинамического процесса

Fig. 9. Acoustic pressure distribution at the frequencies of *a*) the 2nd and *b*) the 4th harmonics of hydrodynamic process

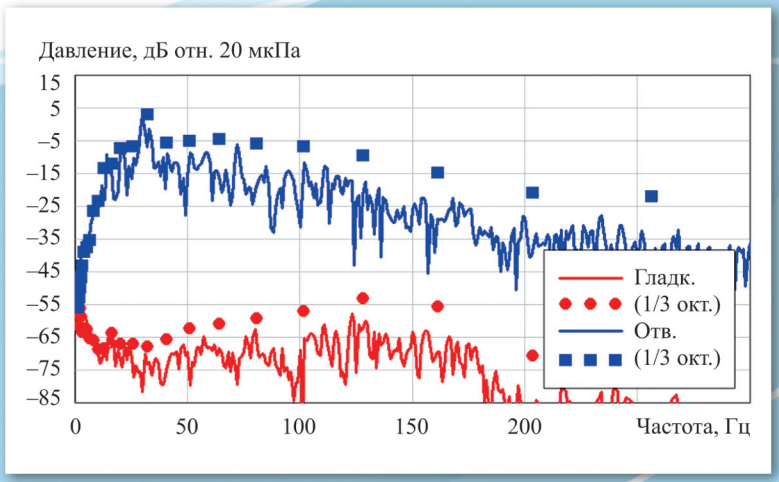


Рис. 10. Амплитудно-частотные характеристики гладкой обшивки и обшивки с отверстием

Fig. 10. Amplitude & frequency parameters of the smooth and the perforated plating

Рис. 4. Результаты расчета по гидродинамической модели – свободные вихри (цвет соответствует амплитуде скорости)

Fig. 4. Calculation results as per hydrodynamic model: free vortices (the colour corresponds to velocity amplitude)

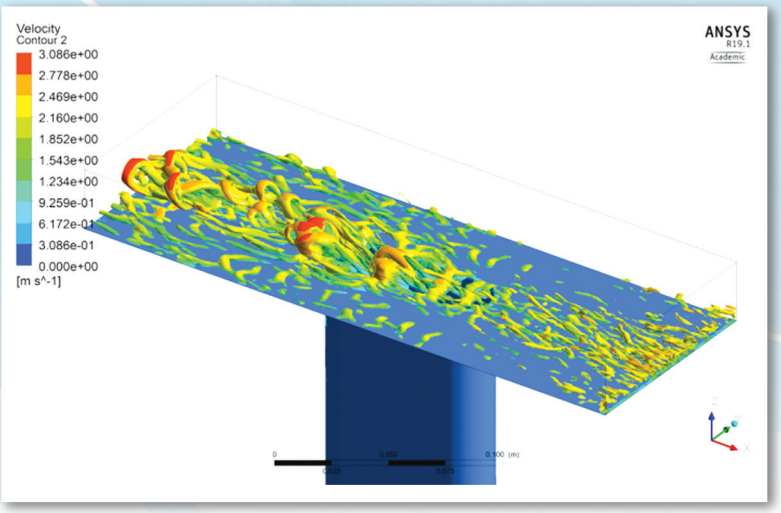


Рис. 5. Величина акустических источников в продольной плоскости симметрии

Fig. 5. The size of acoustic sources in the longitudinal plane of symmetry

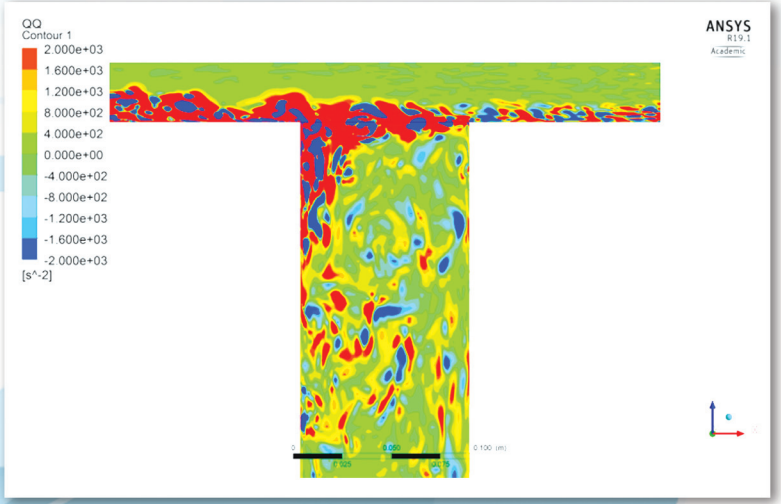
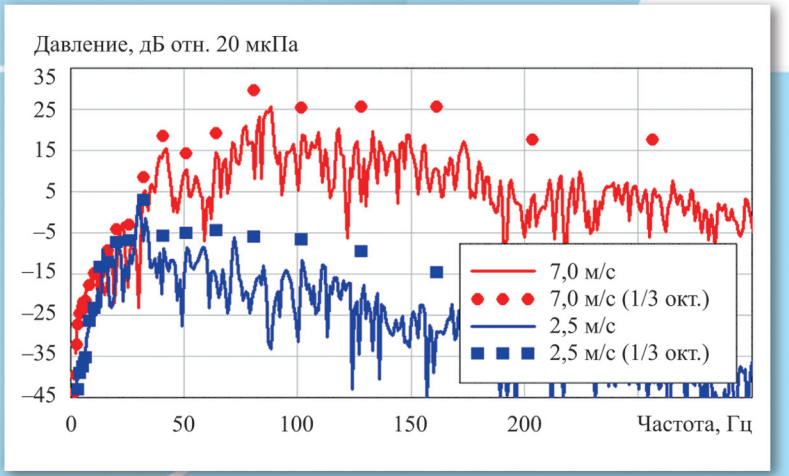


Рис. 6. Гидродинамический шум, возникающий на отверстии в обтекателе, для двух скоростей потока (показаны максимальные значения уровня звукового давления на проходной характеристике)

Fig. 6. Flow noise generated by a hole of the fairing at two flow speeds (maximum acoustic pressures along the measurement line)



post code 603950. Tel.: 8 (831) 416-47-85. E-mail: suvorov@hydro.appl.sci-nnov.ru.

Pavel S. Kalyasov, Cand. Sci. (Eng.), Lead Engineer, RAS Institute of Applied Physics. Address: 46, Ulyanova st., GSP-120, Nizhny Novgorod, Russia, post code 603950. Tel.: 8 (831) 416-47-85. E-mail: pkalyasov@mail.ru.

Pavel I. Korotin, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director for Researches, Head of Hydroacoustic Centre, Head of Physical Acoustics Department, RAS Institute of Applied Physics. Address: 46, Ulyanova st., GSP-120, Nizhny Novgorod, Russia, post code 603950. Tel.: 8 (831) 416-06-30. E-mail: monitor@appl.sci-nnov.ru.

Yevgeny M. Sokov, Lead Programmer, RAS Institute of Applied Physics. Address: 46, Ulyanova st., GSP-120, Nizhny Novgorod, Russia, post code 603950. Tel.: 8 (831) 416-06-30. E-mail: evgeniy.sokov@ipfran.ru.

Viktor V. Artelny, Senior Researcher, RAS Institute of Applied Physics. Address: 46, Ulyanova st., GSP-120, Nizhny Novgorod, Russia, post code 603950. Tel.: 8 (831) 416-49-72. E-mail: artel@hydro.appl.sci-nnov.ru.

Поступила / Received: 04.06.19
Принята в печать / Accepted: 22.07.19
© Коллектив авторов, 2019