

В диссертационный совет  
Д 212.125.05 при ФГБОУ ВПО  
"Московский авиационный  
институт (национальный  
исследовательский университет)"  
МАИ 125993, г. Москва, А-80,  
ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

### ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Денисова Станислава Леонидовича «Комплексные исследования проблем долговечности ортотропных полигональных пластин с учетом эффектов экранирования шума от некомпактных источников», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» и по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Работа посвящена актуальным задачам авиационной акустики, связанным с изучением долговечности авиационных конструкций, подвергающихся акустическому воздействию, а также вопросам снижению шума на местности с помощью эффекта экранирования. Основным объектом исследований в работе являются полигональные ортотропные пластины неканонической формы, которые не только являются элементами силовой конструкции планера летательного аппарата, но и исполняют роль акустических экранов, изменяющих направленность излучения шума авиационными силовыми установками.

На сегодняшний день общая теория расчёта отклика и долговечности пластин, подверженных внешнему акустическому воздействию с широким спектром, находится на высоком уровне развития. Но влияние пространственной структуры нестационарных акустических полей на напряжённо-деформированное состояние и долговечность упругих пластин изучено недостаточно полно. Это связано с тем, что ранее рассматривались прямоугольные пластины с простыми условиями закрепления, а также упрощенные модели акустических полей. В силу этого применявшиеся методы исследований носили полуэмпирический характер, что затрудняло понимание механики явления.

При изучении эффекта экранирования шума летательных аппаратов на местности с учётом дифракции звука на краях экранирующих пластин, как в дальнем, так и в ближнем поле, возникла потребность разработки новых методов

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № 02  
"12" 02 2018

и алгоритмов расчета отклика и долговечности с помощью новых задач, описывающих распространение акустических волн. Трудность решения этих задач обусловлена тем фактом, что авиационным источникам шума свойственны следующие характерные особенности: они некомпактны (длины излучаемых волн меньше или сравнимы с размерами источника), располагаются от экранирующих поверхностей на расстояниях, сравнимых с характерной длиной волны, а также присутствует спутный поток, обтекающий экраны.

Актуальность этих задач обусловлена потребностями развития современной авиационной науки и техники.

Диссертация состоит из введения и четырёх глав. Во введении проводится обоснование актуальности диссертационной работы, а также формулируется цель и описана новизна исследований.

**Научная новизна** представленной диссертационной работы состоит в разработке гибридного численно-аналитического метода для расчета отклика и долговечности ортотропных полигональных пластин, подвергающихся акустическому воздействию с широким спектром, при произвольных условиях закрепления пластины и произвольной пространственной структуре действующего акустического поля.

На основе Геометрической Теории Дифракции (ГТД) впервые разработан и реализован алгоритм расчета экранирования звука плоскими полигональными экранами с учетом вклада волн вторичной дифракции при наличии однородного спутного потока. На основе теоремы взаимности выполнена экспериментальная валидация предложенного метода расчета экранирования на плоских прямоугольных экранах и маломасштабных моделях с помощью метода последовательностей максимальной длины.

Предложен алгоритм оценки эффективности экранирования шума высокоскоростных струй, на основе проведения комплекса расчетных и экспериментальных исследований. С помощью разработанного алгоритма расчета экранирования решена новая задача дифракции на плоском экране произвольной формы некомпактного источника звука, в качестве которого используется модель волн гидродинамической неустойчивости.

**В первой главе** выполнен подробный обзор литературы, относящейся к теме диссертации, а также описано современное состояние проблемы расчета долговечности и экранирования звука плоскими полигональными пластинами в акустическом поле с некомпактными источниками.

Приведена формулировка трёхмерной задачи рассеяния акустических волн от некомпактного источника на тонком плоском экране в потенциальном потоке. Экраном является упругая полигональная ортотропная пластина с различными граничными условиями закрепления на контуре. Пренебрегая звуком,

излучаемым колеблющейся пластиной, по сравнению со звуком, рассеянным ее границами, исходная задача сведена к задаче дифракции звука на акустически абсолютно жёстком плоском полигональном экране.

Также в первой главе вводится понятие момента спектральной плотности произвольного порядка, посредством которого далее будут выполняться расчёты, как среднеквадратичных напряжений, так и долговечности пластины. Приведены основные расчётные соотношения, необходимые для использования методов Геометрической Теории Дифракции (ГТД) и проведено сравнение с другими методами расчёта дифракции. Показано, что ГТД наиболее точно передает как амплитудную, так и фазовую структуру дифрагированного на экране поля. Также в главе представлены основные соотношения, используемые при экспериментальной проверке ГТД, выполненной с помощью метода последовательностей максимальной длины (метод М-последовательностей). Помимо этого, в рамках модели стохастической теории волн неустойчивости, представлен краткий вывод основных выражений для расчёта шума, излучаемого высокоскоростными струями.

Расчётные соотношения, представленные в первой главе, используются в дальнейшем при расчете отклика и долговечности пластин, а также при расчете эффективности экранирования звука, как точечными, так и некомпактными источниками. Использование предположения о малости звука, переизлучаемого пластиной, при расчете долговечности позволяет получить для нее оценку сверху.

**Во второй главе** описан численно-аналитический метод решения задачи долговечности для ортотропной полигональной пластины и верификация этого метода на примере задачи, имеющей точное аналитическое решение.

Предложенный численно-аналитический метод основан на разложении решения в ряд по собственным функциям краевой задачи для линейного дифференциального оператора, описывающего динамическое поведение ортотропной пластины в вакууме. Описаны фундаментальные решения задачи расчёта отклика и долговечности закреплённой, различными способами, по периметру ортотропной полигональной пластины, подвергающейся акустическому воздействию с произвольным спектром. Получено аналитическое выражение для момента спектральной плотности произвольного порядка, позволяющего проводить расчёт отклика и долговечности.

Численная реализация метода использует дискретное моделирование пластины с помощью треугольных конечных элементов с девятью степенями свободы. При помощи коммерческого программного пакета промышленного уровня (NX NASTRAN) проведен расчёт собственных функций и собственных значений соответствующего линейного дифференциального оператора

описывающего динамику перемещений срединной поверхности ортотропной пластины.

Разработанный численно-аналитический метод решения задачи отклика и долговечности является новым, а использованные алгоритмы и полученные результаты имеют как научную, так и практическую ценность.

**В третьей главе** содержатся результаты исследований экранирования прямоугольными пластинами шума точечных и некомпактных источников.

На основе Геометрической Теории Дифракции предложен алгоритм расчета экранирования прямоугольным экраном шума монополюсного источника с учетом волн вторичной дифракции. Валидация предложенного алгоритма расчета выполнена с помощью метода последовательностей максимальной длины, который позволяет выделить и идентифицировать вклады различных рассеивающих элементов экрана в измеряемое звуковое поле. Сравнение расчётных и экспериментальных данных демонстрирует хорошее совпадение, а анализ вклада волн вторичной дифракции в полный отклик показал, что этот вклад мал и, при проведении дальнейших расчётов, его можно не учитывать.

Проведенное экспериментальное исследование экранирования шума струи выявило чувствительность спектра снижения шума (в зоне геометрической тени) от положения экрана относительно кромки сопла и точки наблюдения. Причем в зависимости от этих факторов для различных частотных компонент может наблюдаться как снижение шума, так и его усиление. Анализ влияния спутного потока на эффекты экранирования звука прямоугольным экраном показал, что при малых скоростях спутного потока и больших скоростях истечения, шум струи превосходит шум обтекания пластины. Этот факт позволяет при проведении расчетов на задней кромке пластины использовать условия Мейкснера, а не условия Кутта-Жуковского. Благодаря этому, с помощью преобразования Прандтля-Глауэрта, разработанный ранее на основе ГТД алгоритм расчёта экранирования, может быть перенесен на случай спутного потока.

Также на основе стохастической теории шума волн неустойчивости из расположенных на оси струи монополей сформирован некомпактный источник, для которого получено аналитическое выражение, позволяющее вычислить диаграмму направленности излучения. Анализируя экспериментальные данные для экранирования шума высокоскоростной струи, а также используя разработанный алгоритм расчёта эффективности экранирования, получено выражение для расчёта звукового поля экранированной струи в произвольной точке наблюдения.

Можно считать, что разработан новый алгоритм расчёта эффективности экранирования прямоугольным экраном шума как точечного, так и некомпактного источника при наличии спутного потока в произвольной точке наблюдения.

**Четвертая глава** посвящена изучению отклика, долговечности и эффективности экранирования плоскими полигональными пластинами и экранами шума, излучаемого некомпактными источниками типа волн неустойчивости затопленной струи.

Проведено обобщение алгоритма расчёта эффективности экранирования на случай плоских полигональных экранов с последующей валидацией с помощью метода последовательностей максимальной длины на примере экранирования звука масштабной моделью самолёта интегральной компоновки.

Для точечного монополюсного источника выполнен расчёт эффективности экранирования плоским полигональным экраном при наличии спутного потока при различных числах Маха. Также для некомпактного источника выполнен расчёт распределения уровней звукового давления в плоскости наблюдения при его экранировании плоским полигональным экраном.

Проведены расчёты среднеквадратичных напряжений и долговечности для прямоугольной и плоской полигональной пластин при воздействии шума, излучаемого волнами неустойчивости затопленной струи.

Разработанные в диссертации методы решения рассмотренных задач и полученные результаты являются новыми и представляют научную и практическую ценность.

Достоверность полученных результатов в случае расчёта отклика и долговечности обеспечивается сравнением с задачами, имеющими точное аналитическое решение. В случае расчёта шума, излучаемого волнами неустойчивости затопленной струи, достоверность обеспечивается корректным использованием математического аппарата.

Достоверность экспериментальных результатов измерения шума струи обеспечивается проведением исследований в сертифицированной акустической камере АК-2 (ЦАГИ) в соответствии с ГОСТ ISO 3745-2014 «Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению», а также использованием экспериментальных установок, регистрирующей и анализирующей аппаратуры, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к прецизионным измерениям.

Достоверность экспериментальных результатов, относящихся к методу М-последовательностей, обеспечивается, как сравнением с простым случаем распространения волн в пространстве при отсутствии экранирующих поверхностей, так и сравнением вычисленных значений импульсного отклика с измеренным экспериментально

**Необходимо сделать следующие замечания:**

1. Редакторские замечания: наличие опечаток; маленький размер осей на рисунках (например, рис. 2.2.5, на стр.80); неудачная цветовая гамма

(например, рис. 2.3.3, на стр. 95); на рис. 3.4.1 – 3.4.3 по оси ординат не указаны единицы измерений; на стр.62 используется термин «оператор», хотя по смыслу необходимо использовать термин «упругий дифференциальный оператор».

2. Нет разъяснений, почему при расчете эффективности экранирования используются 1/3-октавные спектры, а не узкополосные.
3. Термин калибровочная постоянная следует признать не удачным, более подходящим является термин поправочная постоянная или поправочный спектр мощности.
4. В работе употребляются термины, носящие нестрогий характер: на стр.33 используется термин «акустический потенциал», хотя более корректно использовать термин потенциал поля акустических скоростей; термин «волна неустойчивости» является дословным переводом англоязычного словосочетания «instability wave», хотя по смыслу это волны, обусловленные неустойчивостью затопленной струи.
5. Необходимо отметить, что уравнения теории упругости для пластин (1.2.5) справедливы только для длинных (по материалу пластины) волн. Все теоретические исследования справедливы только для достаточно низких частот.
6. Ортотропная пластина представляет собой некий ансамбль скрепленных между собой пластин. Совершенно ясно, что для полного исследования колебаний такой пластины нужно обязательно учитывать взаимодействие между собой всех пластин ансамбля. Это взаимодействие в работе не изучено.
7. В работе не учитывается взаимодействие экрана с гидродинамическими источниками звука. Это особенно важно для кромки сопла и кромок пластины.
8. Известно, что любое векторное поле можно представить в виде суммы потенциального и соленоидального полей. Для газа это будет поле акустических скоростей и поле, обусловленное слабыми вихрями основного потока. Если вихри основного потока имеют периодическую структуру по пространству, то пластина в потоке будет излучать звук. Это звук обусловленный пульсациями основного потока. Не ясно насколько соотношение 1.2.16 (или иное) учитывает пульсации основного потока.
9. В работе не рассматривается возможность наличия препятствия за экраном или перед экраном. Наличие таких объектов означает, что в системе имеются замкнутые «бильярдные траектории» для которых (на которых) возможны резонансные явления.

Все замечания носят редакционный характер или указывают на дальнейшее развитие проведенных исследований.

Диссертация Денисова С.Л. выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по физико-математическим наукам.


Основные результаты диссертации опубликованы в 31-ой работе, 9 из которых – в рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендуемый ВАК.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Денисов С.Л. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» и 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Сухинин Сергей Викторович, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Денисова Станислава Леонидовича и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, специальность ВАК 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева (ИГиЛ) СО РАН, г. Новосибирск.  
<http://www.hydro.nsc.ru/>

  
06.02.2018

Сухинин Сергей Викторович

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15  
Телефон: +7(383) 330-12-43  
E-mail: [sukhinin@hydro.nsc.ru](mailto:sukhinin@hydro.nsc.ru)



Подпись д.ф.-м.н. Сухинина Сергея Викторовича заверяю

*Ученый секретарь* *Аношина Любовь Александровна*