Запорожский машиностроительный институт им. В.Я.Чубаря

На правах рукописи

ГОРБАНЬ Светлана Федоровна

УДК 539.3:534.I

ГИДРОУПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ И ЗВУКОИЗЛУЧЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Запорожье - 1993

Работа выполнена в Запорожском машиностроительном институте на кафедре прикладной математики

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор В.А.Толок

Научный консультант - доктор технических наук, доцент С.Н.Бешенков

Официальные оппоненты - зав. кафедрой программного обеспечения и математического моделирования Запорожского индустриального института, доктор физико-математических наук, профессор В.И.Пожуев;

- ведущий научный сотрудник Института проблем машиностроения АН Украины (г.Харьков), доктор технических наук Е.Г.Янютин

Ведущая организация - Московский авиационный институт

Защита состоится «15» июня 1993г. в 15 час. на заседании специализированного совета К 068.38.01 при Запорожском машиностроительном институте им. В.Я. Чубаря по адресу: 330063, г. Запорожье, ГСП - 39, ул. Жуковского 64, ауд. 253

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 4 мая 1993г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук,
профессор И.П. Волчок

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие современных отраслей машиностроения требует разработки эффективных методов динамического расчета элементов конструкций, подверженных воздействию гармонических нагрузок. При этом часто возникает необходимость не только в определении их динамических перемещений и характеристик напряженно-деформированного состояния, но и в решении вопросов, касающихся борьбы с шумом и вибрациями элементов различного рода конструкций. Снижение уровня шума и вибраций механизмов и машин способствует повышению качества, надежности, экономичности технических систем, а также улучшению физиологических параметров окружающей акустической среды. Объектами виброзалиты, как правило, являются конструкции, обладающие существенной деформируемостью: балки, пластины, оболочки. Они широко применяются в космической и авиационной технике, наземном и водном транспорте, энергетических и гидротехнических установках, строительстве в качестве основных несущих элементов, находящихся обычно в условиях жесткого динамического нагружения. В связи с этим актуальной задачей является исследование их поведения при действии заданных динамических нагрузок и возникающей при колебаниях реакции акустической среды. Основная сложность решения подобных задач связана с наличием взаимной зависимости между колебаниями механической системы и среды, а практическая реализация известных методов решения требует сложных вычислений, больших объемов памяти ЭВМ и машинного времени. При анализе взаимодействия со средой трехслойных конструкций появляются дополнительные трудности, связанные с необходимостью учета специфики их деформирования по сравнению с однородными, что не позволило до настоящего времени провести достаточно полное исследование в данном направлении.

Цель работы. Разработка и реализация на ЭВМ эффективных методов решения гранично-контактных задач о вынужденных колебаниях и излучении звука ограниченными трехслойными пластинами и оболочками, взаимодействующими с акустической средой, а также изучение на их основе закономерностей указанных физических процессов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан метод расчета гидроупругих колебаний и звукоизлучения ограниченных трехслойных пластин и цилиндрических обо-

лочек, свободный от упрощающих гипотез о характере взаимодействия конструкции и среды и допускающий вместе с тем сравнительно простую численную реализацию;

- на основе этого метода проведено детальное фактическое исследование зависимостей резонансных частот, амплитуд и форм колебаний указанных конструкций от их размеров, геометрических и физических параметров слоев, демпфирующих свойств заполнителя, а также характера и частоты возбуждения;

- проведен анализ характеристик создаваемых ими в среде звуковых полей;

- получены решения новых задач о взаимодействии с идеальной сжимаемой жидкостью трехслойных пластин, закрепленных в экране конечных размеров и в днище полубесконечного жесткого цилиндра;

- дано обобщение разработанного метода и получены решения новых задач о взаимодействии с жидкостью составных трехслойных конструкций.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается корректным использованием механико-математического аппарата, численной проверкой сходимости предложенных решений, сопоставлением результатов, полученных различными методами, сравнением их с данными других авторов, анализом решений с точки зрения их физической достоверности.

Практическая ценность работы. Разработанные численные методы и алгоритмы и созданные на их основе программы могут быть использованы в НИИ и КБ при оценке вибрационных и акустических характеристик элементов конструкций современной техники и оборудования. В частности, в рамках хоздоговорной тематики кафедры прикладной математики Запорожского госуниверситета результаты исследований внедрены в НИИМаш (г.Дзержинск, Нижегородская обл.).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на:

- I Всесоюзной конференции "Технологические проблемы прочности несущих конструкций" (г.Запорожье, 1991г.);

- ежегодных научных конференциях Запорожского госуниверситета (г.Запорожье, 1989-1993гг.);

- научных семинарах кафедры прикладной математики Запорожского госуниверситета под руководством проф. Толока В.А.

- межкафедральном тематическом семинаре по специальности

01.02.04 - "Механика деформируемого твердого тела" Запорожского машиностроительного института;

- научном семинаре кафедры теоретической механики Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии под руководством проф. Сабодаша П.Ф.;

- научном семинаре кафедры сопротивления материалов Московского авиационного института под руководством проф. Горшкова А.Г.;

- научном семинаре отдела гидродинамики волновых процессов Института гидромеханики АН Украины под руководством проф. Селезова И.Т.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы (154 наименования) и приложения. Общий объем 192 страницы, включая 60 рисунков, 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе излагается современное состояние вопроса, формулируются цели и задачи исследования.

Проведенный обзор работ показывает, что в настоящее время недостаточно изученными являются задачи о гидроупругих колебаниях и излучении звука ограниченными пластинами и оболочками. Строгое исследование взаимодействия со средой ограниченных экранированных пластин путем решения интегродифференциальных уравнений их колебаний проводилось в работах Гужаса Д.Р. и Борисова Л.П., Гуровича Ю.А., Святенко В.А., Шендерова Е.Л., Alper S. и Magrab E.B., Leppington F.G., Suzuki H. и Ticky J., Sandman B.E., Wallace C.E. При этом применялась процедура Lax M. сведения задачи к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений, причем прогибы пластины в среде раскладывались в ряд по ее собственным формам колебаний в вакууме, а давление на поверхности представлялось интегралом Гюйгенса. Однако такой подход связан с большими вычислительными трудностями и поэтому разрабатывались другие методы решения гранично-контактных задач.

Головановым В.А., Поповым А.Л., Чернышевым Г.Н. предложен метод, основанный на экспоненциальном представлении звукового давления вблизи поверхности пластины.

Конечно-разностный метод решения интегро-дифференциальных уравнений гидроупругих колебаний полосы и круглой пластины рассматривался Голованoвым В.А. В работах Слепяна Л.И. и Сорокина С.В, Filippi P, Photiadis D.M задачи об излучении и рассеянии звука упругой полосой сведены к интегральному уравнению второго рода относительно звукового давления на поверхности конструкции. Метод конечных элементов для расчета вынужденных колебаний пластин в жидкости и звукоизоляции использован Бешенковым С.Н. и Волковой Т.Д.

Анализ различных аспектов взаимодействия с акустической средой ограниченных цилиндрических оболочек можно найти в работах Лебедева А.В., Harari A. и Sandman B.E., Laulagnet B и Guyader J.L., Stepanishen P.R, исследования звукоизлучения проведены Бернблитом М.В., Музыченко В.В., Рыбаком С.А., изучение звукоизоляции Chonan S. и Koriyama H. Численный метод расчета вынужденных колебаний экранированной цилиндрической оболочки предложен Filippi P и Habault D.

Различные методы решения задач о гидроупругих колебаниях и излучении звука замкнутыми оболочками вращения, а также составными оболочечными конструкциями предложены Васильевым Д.Г., Симоновым И.Г., Гольденвейзером А.Л. и Радовинским А.Л., Поповым А.Л. и Чернышевым Г.Н., Поповым О.Н., Ционским А.Я. и Юдиным А.С. Метод граничных интегральных уравнений использовался Слепяном Л.И. и Сорокиным С.В.

Что касается слоистых конструкций, то анализ их взаимодействия с акустической средой проводился до недавнего времени с использованием бесконечной модели. Вопросам излучения и передачи звука неограниченными трехслойными пластинами посвящены работы Бешенкова С.Н.,Голоскокова Е.Г. и Ольшанского В.П., Рыбака С.А., Тартаковского Б.Д. и Швилкиной О.Г., Kurtze G. и Watters B. Meier A.V, Dym C.L. и Langma, Lai J.L, Nilson A. Экспериментальные исследования проводили Ford R.D, Lord P и Walker A.W., Smolenski C.P. и Krokosky E.M.

Ограниченность размеров трехслойной пластины-полосы учтена Бешенковым С.Н. и Волковой Т.Д., а для свободно опертой прямоугольной пластины - Sandman B.E. Ограниченные трехслойные оболочки не рассматривались.

Анализ публикаций свидетельствует о том, что многие аспекты

проблемы взаимодействия тонкостенных элементов конструкций с акустической средой остаются частично или полностью неизученными. Особенно это касается слоистых ограниченных пластинчатых и оболочечных конструкций. Поэтому, разработка новых эффективных методов расчета и проведение дальнейших исследований является актуальной задачей.

Во второй главе рассматриваются плоская и осесимметричная задачи стационарной гидроупругости трехслойных пластин, закрепленных в бесконечном жестком экране. Решение построенных на основе гипотезы "ломаной линии" уравнений движения пластины ищется в виде разложений по ортогональным системам функций, удовлетворяющих только условию равенства нулю прогиба на контуре. Аналогичными рядами представляются возбуждающая нагрузка, неизвестное поверхностное звуковое давление, аппроксимируемое кусочно-линейной функцией, а также дополнительно вводимые нагрузки, представляющие собой приложенные к контуру пластины изгибающий момент и касательную силу. Подстановка всех перечисленных разложений в уравнения движения пластины, а также в оставшиеся невыполненными краевые условия , позволяют найти коэффициенты ряда для прогиба

$$a_k = a_k' + \sum_{j=1}^{N+1} p_j a_{kj}', \qquad (1)$$

которые выражаются через параметры пластины, возбуждающую нагрузку и неизвестные узловые значения p_j реакции жидкости.

Для отыскания этих неизвестных полученное выражение для прогиба

$$w = \sum_{k=1}^{\infty} a_k w_k, \qquad (2)$$

где $w_k(r) = J_0(x_k r/a)$, $J_0(x_k) = 0$ и $w_k(x) = \sin\frac{k\pi x}{\ell}$ соответственно в осесимметричной и плоской задачах, подставляются в интеграл Гюйгенса, который связывает звуковое давление в каждом из узлов пластины с найденным по формуле (2) прогибом и записывается разность звуковых давлений по обе стороны пластины в произвольной её точке

$$p(A) = \frac{\omega^2 \rho_0 n}{2\pi} \int_S w(B) \frac{\exp(ik_0 R)}{R} ds, \quad R = |AB| \qquad (3)$$

Здесь ρ_0, c_0 - параметры жидкости, k_0 - волновое число, коэффициент n равен I или 2 при наличии жидкости с одной или двух сторон соответственно.

В плоской задаче последнее выражение с учетом соотношения

$$\underline{I} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(ik_0\sqrt{x^2+y^2})}{\sqrt{x^2+y^2}}\, dy = \pi i H_0^{(1)}(k_0|x|) \qquad (4)$$

приводится к интегралу по ширине пластины.

Разрешающая система линейных алгебраических уравнений относительно искомых величин p_j формируется после этого путем совмещения точки A последовательно с каждым из узлов пластины. При вычислении содержащихся в коэффициентах полученных систем интегралов от произведений функций $w_k(x)$ на соответствующее фундаментальное решение уравнения Гельмгольца интегрирование по участкам, содержащим рассматриваемый узел, проводилось с использованием специальных приемов, основанных на устранении особенности у подинтегральной функции путем перехода к локальной полярной системе координат (в осесимметричном случае) и на ее численном интегрировании по особой формуле (в плоском).

По изложенному методу выполнено исследование зависимостей резонансных частот и амплитуд гидроупругих колебаний, а также величины и пространственного распределения создаваемого в среде звукового давления от геометрических и физических параметров слоев, размеров пластины, характера и частоты возбуждения, а также демпфирующих свойств заполнителя, учет которых осуществлялся путем введения комплексных упругих постоянных

$$\bar{E} = E(1-i\eta), \quad \bar{G} = G(1-i\eta). \qquad (5)$$

Сравнительный анализ колебаний и звукоизлучения взаимодействующих со средой трехслойных и однородных пластин равного погонного веса показал наличие у них таких общих закономерностей как: смещение резонансов по сравнению со случаем колебаний в вакууме в область более низких частот; перемена на резонансных частотах знака у действительных составляющих прогиба и поверхностного звукового давления и достижение максимумов их мнимых составляющих; отличие от нуля звукового давления на контуре пластины и соответствие характера его распределения по поверхности пластины распре-

делению прогиба; уменьшение резонансных максимумов прогиба и звукового давления только при достижении больших значений коэффициента потерь; квазиэкспоненциальный закон убывания давления вблизи поверхности пластины; усиление направленности излучения с ростом частоты; близость частотных зависимостей акустической мощности излучения бесконечных и ограниченных пластин вне резонансных зон последних.

Вместе с тем, резонансные частоты трехслойных пластин (за исключением основного резонанса у пластин с легким заполнителем) лежат ниже, чем у однородных, расположены они ближе друг к другу и поэтому убывание амплитуды колебаний и возрастание величины поверхностного звукового давления с ростом номера резонанса происходит у них медленнее. Указанные особенности проявляются наиболее ярко при таком изменении параметров, которое сопровождается увеличением влияния сдвиговых деформаций заполнителя на поперечные колебания пластины.

При исследовании влияния на гидроупругие колебания несимметрии строения пластины установлено, что первая резонансная частота пластин несимметричного строения лежит ниже, а амплитуда колебаний больше (особенно в случае тяжелого заполнителя), чем у пластин с одинаковой толщиной обшивок. Значения последующих резонансных частот оказываются меньше, а амплитуда колебаний больше у пластин симметричного строения (особенно с легким заполнителем).

Сравнение полученных результатов с данными расчетов гидроупругих колебаний пластины-полосы методом Галеркина дает хорошее их совпадение между собой только при учете, во втором случае, эффекта взаимодействия между различными формами колебаний через среду.

Точность всех проведенных расчетов контролировалась путем сопоставления результатов, получаемых при увеличении числа участков разбиения и членов удерживаемых в рядах.

<u>В третьей главе</u> на основе разработанного метода проводятся дополнительные фактические исследования, связанные с анализом влияния на гидроупругие колебания трехслойных пластин сжимаемости заполнителя, характера контакта слоев и конечности размеров экрана.

Сжимаемость учитывалась путем построения дифференциальных уравнений движения пластин на основе гипотез о линейном распределении тангенциальных и поперечных перемещений в заполнителе.

Установлено, что в частотном диапазоне, который включает первые три резонанса пластины сжимаемость заполнителя приводит к незначительному снижению резонансных частот и почти не сказывается на величине амплитуд колебаний. При высокочастотном возбуждении неучет сжимаемости приводит к значительной погрешности в результатах, а на частоте, где возникает первый резонанс симметричных колебаний – к искажению физической картины взаимодействия пластины со средой.

При изучении вопроса о влиянии характера контакта слоев использовался подход, состоящий в рассмотрении движения однородного слоя (заполнителя) под действием системы нормальных и касательных нагрузок, выраженных через параметры обшивок и их перемещения на границе с заполнителем. При этом касательные нагрузки со стороны обшивок и касательные напряжения в заполнителе на границах сопряжения полагались равными нулю, что приводило к появлению дополнительных неизвестных и следовательно к увеличению числа уравнений. Исследования показали, что скользящий контакт слоев приводит к значительному, по сравнению со случаем непрерывного контакта, снижению частот резонансных колебаний как в вакууме так и в воде. Модуль прогиба при этом соответственно возрастает, качественная же картина зависимости действительной и мнимой составляющих прогиба от частоты возбуждения остается прежней.

Для пластины закрепленной в экране конечного размера звуковое давление в любой её точке определяется с помощью выражения

$$p(x) = \frac{\omega^2 \rho_0}{2\pi} \int_0^a \int_0^{2\pi} w(x_1) \frac{\exp(ik_0 R)}{R} x_1 dx_1 d\theta + \tag{6}$$

$$+ \frac{i\omega^2 \rho_0}{2\pi} \int_b^\infty \int_0^{2\pi} v(x_1) \frac{\exp(ik_0 R)}{R} x_1 dx_1 d\theta ,$$

где $w(x)$ прогиб пластины, который находится по формуле (2), $v(x)$ – неизвестное распределение колебательной скорости на свободной поверхности жидкости, которое аппроксимируется кусочно-линейной функцией.

Далее точка наблюдения помещалась последовательно в узлы на поверхности пластины и жидкости и с учетом того, что на свободной поверхности жидкости давление равно нулю осуществлялся переход к

бесконечной системе алгебраических уравнений относительно неизвестных ρ_j и v_n

$$\sum_{j=1}^{N+1} a_{mj}\rho_j + \sum_{n=1}^{\infty} b_{\ell n} v_n = c_\ell, \quad \ell = 1, 2, \ldots \tag{7}$$

которая решалась методом редукции.

Отмечено, что конечность размеров экрана приводит к смещению резонансов в область более высоких частот и к значительному росту амплитуд резонансных колебаний и звукового давления. При удалении от резонансов величины прогибов пластины в конечном и бесконечном экранах совпадают.

С вопросами звукоизлучения тесно связана задача прохождения звуковых волн через пластину. Звукоизоляционные свойства ограниченных пластин исследуются в работе на примере трехслойных пластины -полосы и прямоугольной пластины. Колебания пластин возбуждаются плоскими звуковыми волнами единичной амплитуды, а действующая нагрузка представляет собой сумму давлений в падающих, отраженных от абсолютно жесткой плоскости и излученных пластиной волнах и для прямоугольной пластины запишется в виде

$$\begin{gathered} f(x,y) = q(x,y) + p(x,y), \\ q(x,y) = 2\exp[ik_0(x\cos\varphi\sin\theta + y\sin\varphi\sin\theta)] \\ p(x,y) = \frac{\omega^2\rho_0}{\pi}\iint_S w(x_1,y_1)\frac{\exp(ik_0 r)}{r}\,dS \\ r^2 = (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 \end{gathered} \tag{8}$$

Рассматриваемая задача отличается от задачи о вынужденных колебаниях лишь тем, что нагрузка и коэффициенты разложения ее в ряд по собственным формам колебаний пластины являются комплексными. Поэтому предложенный во второй главе метод может быть использован для исследования звукоизоляции ограниченных трехслойных пластин. Однако коэффициенты получающейся при этом разрешающей системы уравнений являются громоздкими, что осложняет вычисления.

Если в выражении (8) пренебречь вторым слагаемым, т.е. принять, что давление в излучаемых пластиной волнах мало по срав-

нению с давлением в волнах падающих на пластину и отраженных от нее, то можно воспользоваться итерационным методом, который существенно упрощает расчет звукоизоляции ограниченных пластин, находящихся в среде малой плотности (воздухе). Итерационная схема была применена к решению задачи о прохождении плоской звуковой волны через трехслойную прямоугольную пластину свободно опертую на бесконечный абсолютно жесткий экран.

Анализ результатов показывает, что минимумы звукоизоляции соответствуют собственным частотам колебаний пластины. Уменьшение числа минимумов при углах падения $\varphi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ связана с тем, что при нагружении симметричном относительно одной или двух осей симметрии пластины, формы колебаний с четным числом полуволн по этим осям не возбуждаются. Вне резонансных частот звукоизоляция пластины при изменении углов падения волны меняется незначительно. Для сравнения был проведен расчет прохождения звука через квадратную пластину, изготовленную из материала обшивок такого же погонного веса, что и трехслойная. Установлено, что собственные частоты трехслойной пластины лежат ниже соответствующих собственных частот однородной за исключением первой резонансной частоты. Кроме того, частотный спектр трехслойной пластины является более густым, чем у однородной. Отмечено также, что на низких частотах наблюдается отклонение изолирующей способности пластин от "закона массы", причем отклонение у трехслойных пластин выражено значительно ярче, чем у однородных из-за влияния сдвиговых деформаций. Для достижения необходимой точности итерационного процесса вне резонансных частот достаточно двух итераций, вблизи резонансов число итераций возрастает.

Четвертая глава посвящена исследованию гидроупругих колебаний и звукоизлучения трехслойных цилиндрических оболочек. Метод расчета, предложенный для ограниченных плоских структур, обобщен и развит на случай оболочечных конструкций. Отличие здесь заключается только в том, что система линейных алгебраических уравнений относительно значений звукового давления в узлах на поверхности оболочки строится с помощью интегрального уравнения Гельмгольца, принимающего с учетом условия совместного движения конструкции и среды следующий вид

$$2\pi p(A) = \int_S \left[p(B) \frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{e^{ik_0R}}{R}\right) - \omega^2 \rho_0 U_n(B) \frac{e^{ik_0R}}{R} \right] dS \quad (9)$$

Здесь A и B точки на поверхности, $\partial/\partial n$ - оператор дифференцирования по внешней нормали к S, R - расстояние между точкой наблюдения A и текущей точкой B, U_n - нормальное перемещение конструкции.

Выражение для нормального перемещения ищется из системы дифференциальных уравнений, описывающих движение оболочки в виде разложений в ряд по ортогональным системам функций, удовлетворяющих краевым условиям свободного опирания торцов оболочки. Такими же рядами представляются возбуждающая нагрузка и неизвестное распределение звукового давления на поверхности оболочки, при этом последнее аппроксимируется кусочно-постоянной функцией. После подстановки всех указанных разложений в уравнения движения оболочки находятся коэффициенты ряда для прогиба U_n, которые выражаются через параметры оболочки, возбуждающую нагрузку и неизвестные узловые значения P_j звукового давления. Далее разрешающая система уравнений относительно P_j получается из (9) путем последовательного совмещения точки наблюдения с каждым из узлов и учета того факта, что U_n отлично от нуля только на поверхности оболочки.

Анализ результатов расчета гидроупругих колебаний свободно опертой по торцам трехслойной цилиндрической оболочки с жесткими днищами показал, что при взаимодействии оболочки с жидкостью сохраняются те же закономерности, что и отмеченные ранее для плоских упругих слоистых структур.

Для оценки влияния эффекта экранирования оболочки на ее вибрационные характеристики был проведен расчет для случая, когда оболочка вставлена между двумя недеформируемыми участками с абсолютно жесткими днищами. Установлено, что наличие экрана конечной длины приводит к возрастанию амплитуды резонансных колебаний оболочки и звукового давления на ее поверхности.

Проведены также исследования гидроупругих колебаний оболочки без учета влияния звукового давления на жестких днищах. Отмечено, что использование такой упрощенной модели дает заниженные значения резонансной частоты и амплитуды колебаний оболочки. Величина погрешности уменьшается с увеличением длины экрана.

Предложенный в данной главе подход можно использовать для расчета гидроупругих колебаний составных пластинчато-оболочечных конструкций. В качестве примера рассмотрена конструкция, состоя-

щая из свободно опертой трехслойной цилиндрической оболочки, закрытой с торцов защемленными по контуру трехслойными пластинами. Установлено, что по сравнению со случаем абсолютно жестких днищ резонансная амплитуда колебаний возрастает, но сама резонансная частота смещается в область более высоких частот незначительно. Аналогичные исследования были проведены для конструкции, которая состоит из трехслойной цилиндрической оболочки и трехслойных пластин, разделенных между собой жесткими участками.

В качестве другого примера составной конструкции рассмотрен находящийся в жидкости цилиндрический канал с абсолютно жесткими стенками, закрытый с торца экранированной трехслойной пластиной. Разрешающая система получается точно также как это было описано выше, но с учетом того, что перемещение конструкции по внутренней нормали вычисляется по формуле (2) и отлично от нуля только на поверхности пластины.

Исследования показали, что по сравнению со случаем закрепления пластины в бесконечном плоском экране, резонансы смещаются в область более высоких частот, что сопровождается ростом амплитуд гидроупругих колебаний и звукового давления. При увеличении размеров экрана (цилиндрической полости) значения модуля прогиба и звукового давления приближаются к соответствующим значениям для пластины, закрепленной в бесконечном экране. Качественная картина изменения действительной и мнимой частей прогиба вблизи резонанса остается такой же как и для пластин, находящихся в бесконечном экране.

Расчет звуковых полей, создаваемых оболочками при вынужденных колебаниях можно существенно упростить, если пренебречь размерами оболочек в осевом направлении и считать их бесконечными. Дальнее звуковое поле, создаваемое находящейся в акустической среде неограниченной трехслойной цилиндрической оболочкой при возбуждении изнутри исследовано с помощью интегрального преобразования Фурье, которое применялось к системе дифференциальных уравнений, описывающих деформирование оболочки, а также к уравнению Гельмгольца и условию безотрывного движения оболочки и среды. В результате осуществлялся переход к системе алгебраических уравнений относительно трансформант перемещений и к системе обыкновенных дифференциальных уравнений относительно изображений звукового давления $\bar{p}$. Далее применяется формула обращения

Фурье и находится интересующая функция $p(r,z)$.

$$p(r,z) = -\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\bar{u}_{нар}\,\omega^2 K_0 H_0^{(1)}(\sqrt{K_0^2-K^2}\,r)\,e^{ikz}}{\sqrt{K_0^2-K^2}\;H_1^{(1)}(\sqrt{K_0^2-K^2}\,R_1)}\,dk \qquad (10)$$

Последний интеграл вычисляется по методу перевала.

Для контроля правильности полученных результатов такая же задача была решена с помощью метода конечных элементов в форме Галеркина. Звуковое давление определяется аналогично тому, как было описано выше по формуле (10) с тем отличием, что вместо $\bar{u}_{нар}$ стоит множитель u_{N+1} - узловое радиальное перемещение на поверхности оболочки.

Проведено сравнение результатов полученных двумя различными методами. Установлено, что в области высоких частот система упрощенных уравнений не позволяет определить все типы волн, которые могут распространяться вдоль оболочки. На низких частотах результаты расчетов практически совпадают. Тоже наблюдается и при излучении в воду.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, которые состоят в следующем:

1. Разработан метод решения задач о гидроупругих колебаниях, излучении звука ограниченными трехслойными пластинами и цилиндрическими оболочками.

2. Проведены исследования характеристик вибрационных и звуковых полей трехслойных пластин в зависимости от характера и частоты возбуждения, параметров слоев и свойств среды.

3. Изучены вопросы влияния на исследуемые процессы сжимаемости заполнителя и характера контакта слоев.

4. Предложена итерационная схема расчета прохождения звуковых волн через трехслойные пластины в среде малой плотности (воздухе).

5. Решены новые задачи о вынужденных колебаниях и звукоизлучении трехслойных пластин, закрепленных в экране конечных размеров, а также экранированной пластины, закрепленной в днище полубесконечного жесткого цилиндра.

6. Рассмотрены вынужденные колебания и излучение звука цилиндрическими оболочками с жесткими и поддатливыми днищами, а также составными трехслойными конструкциями.

7. Проведен анализ дальнего звукового поля бесконечной трехслойной цилиндрической оболочки при возбуждении изнутри.

В приложении приведены документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Бешенков С.Н.,Горбань С.Ф. Излучение звука при вынужденных колебаниях круглой трехслойной пластины. // Прикладная механика. 1990. Т.26. №2.С. 108-112.

2. Бешенков С.Н., Горбань С.Ф., Карякин Г.А. К расчету поперечных колебаний круговых трехслойных пластин. // Сопротивление материалов и теория сооружений. Киев. 1991. № 58. С.104-110.

3. Горбань С.Ф. Прохождение звука через прямоугольную трехслойную пластину. // Депон. УкрНИИНТИ. 1991. № 48 - Ук91 от 02.01.91. 16с.

4. Бешенков,С.Н., Горбань С.Ф. Одномерные гидроупругие колебания трехслойных пластин. // Прикладная математика и механика. 1991. Т.55. № 3. С. 472-477.

5. Бешенков С.Н., Горбань С.Ф. Гидроупругие колебания трехслойных цилиндрических оболочек. // Труды I Всесоюзной конференции "Технологические проблемы прочности несущих конструкций" Т.1.4.1. Запорожье, 1991. С.29-33.

6. Бешенков С.Н., Горбань С.Ф. Звукоизлучение ограниченных трехслойных пластин в жидкости. // Акустический журнал. 1991. Т.37. Вып. 6. С. 1083- 1088.

7. Бешенков С.Н., Горбань С.Ф. Гидроупругие колебания и звукоизлучение цилиндрических оболочек конечной длины. // Изв. Российской АН. Механика твердого тела. 1992. № 3. С. 167-171.

8. Горбань С.Ф. Анализ излучения звука многослойными цилиндрическими оболочками. // Прикладная механика. 1992. Т.28. № 11. С.55-60.

Подписано к печати 19.04.93. Формат 60x84 1/16. Объем 1 п.л.
Заказ № 1161 Тираж 100 экз.

Подразделение оперативной полиграфии рекламно-издательского отдела Запорожского ЦНТИ. 330002, г. Запорожье, пр. Ленина, 77.