

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ЗАПОРОЖСКИЙ ОРДЕНА "ЗНАК ПОЧЕТА"
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. В.Я. ЧУБАРЯ

На правах рукописи

ВОЛКОВА ТАМАРА ДАНИЛОВНА

УДК 539.3

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ЗВУКОИЗЛУЧЕНИЕ ОГРАНИЧЕННЫХ
ПЛАСТИН, ВЗАМОДЕЙСТВУЮЩИХ СО СРЕДОЙ

Специальность: 01.02.04 - "Механика деформируемого
твердого тела"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Запорожье - 1991

Диссертация выполнена на кафедре прикладной математики
Запорожского государственного университета

- Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Толок В.А.
- Научный консультант - кандидат технических наук,
доцент Бешенков С.Н.
- Официальные оппоненты - зав.кафедрой вычислительной и
прикладной математики Москов-
ского автомеханического инсти-
тута, доктор физ.-мат.наук,
профессор Фролов А.п.
- зав.кафедрой ТМ и ТИМ Запорож-
ского машиностроительного инс-
титута, доктор технических
наук, профессор Ройтман А.В.
- Ведущая организация - кафедра теории упругости и
пластичности Киевско-Новгородского
университета им.Н.И.Лобачевского

Защита состоится "15" октября 1991 г. в
16 30 час. на заседании специализированного совета К068.38.01
при Запорожском ордена "Знак Почета" машиностроительном инсти-
туте им.В.Я.Чубаря по адресу: 330063, г.Запорожье, ГСН-39,
ул.Жуковского, 64.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 28 августа 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
Д.Т.К., профессор

И.И.Волчок

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00815577 (X)

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН УРСР

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие современных отраслей машиностроения требует создания эффективных методов расчета элементов конструкций, подверженных воздействиям возбуждающих нагрузок. Анализ динамических процессов в элементах конструкций представляет собой сложную проблему, которая возникает при проектировании, создании и эксплуатации новых машин и аппаратов. Эта проблема связана с оценкой прочности конструкций и необходимостью определения динамических перемещений, скоростей и ускорений, обеспечивающих заданный режим работы конструкций в процессе эксплуатации. Пластины, контактирующие с жидкостью, - распространенная схема элементов этих конструкций.

В настоящее время детально исследованы вынужденные колебания, излучение и передача звука бесконечными однородными и подкрепленными пластинами, взаимодействующими со средой. Перечень публикаций, в которых учитывается как конечность размеров, так и влияние среды на ее колебания, является сравнительно немногочисленным и охватывает, в основном, последние годы, что свидетельствует о возрастающем внимании к указанным вопросам.

Из известных можно отметить статьи Голованова В.А., Попова А.Л., Чернышева Г.А., Ционского, Альпера, Маграб, Стенли и др. В них рассмотрены приближенные аналитические и конечно-разностные решения задач о гармонических колебаниях пластины-полосы и круглой пластины, закрепленных в бесконечном жестком экране.

Самостоятельный интерес представляет определение реакции жидкости при расчетах звуковых полей, создаваемых в среде вибрирующими конструктивными элементами. В этом направлении из-

вестны работы Шендерова Е.Л., Седова М.М., Гуровича Д.А., Ляшова Л.М., Баточарая, Прайс, Рдзанека, Келтика и др., в которых рассматривались вопросы излучения звука ограниченными пластинами без учета влияния среды на их колебания, а также вопросы прохождения звука через упругие пластины.

При переходе к рассмотрению взаимодействия со средой трехслойных конструкций возникают дополнительные трудности, связанные с необходимостью учета деформаций сдвига внешних слоев относительно друг друга и деформаций растяжения - сжатия заполнителя по толщине. Это требует введения в теорию расчета трехслойных конструкций либо обоснованных гипотез о характере деформирования заполнителя, либо рассмотрения последнего в соответствии с общими уравнениями теории упругости. Естественно, что это усложняет решение всех задач и, видимо, по этой причине до сих пор не рассматривались гидроупругие колебания трехслойных конструкций.

Анализ упомянутых и некоторых других работ свидетельствует о том, что многие аспекты проблемы взаимодействия тонкостенных элементов конструкций со средой остаются во многом или полностью неизученными. В связи с этим разработка методов расчета и исследование поведения пластинчатых конструкций, помещенных в жидкую среду и возбуждаемых гармоническими нагрузками, является актуальной задачей.

Таким образом, актуальность проведенных исследований обусловлена, с одной стороны, практической важностью разрешаемых с помощью рассматриваемого подхода задач, с другой - необходимостью разработки математического аппарата и построения алгоритмов, удобных для практического использования при проведении проектно-конструкторских работ.

Целью работы являются: разработка эффективного метода решения задач о вынужденных гармонических колебаниях, излучении и передаче звука ограниченными пластинами, взаимодействующими со средой; исследование, на его основе, характеристик гидроупругих колебаний пластин, влияния параметров пластины, свойств среды, характера и частоты возбуждения на деформирование пластины; анализ звуковых полей и изменения пространственного распределения составляющих давления в ближнем и дальнем звуковых полях, создаваемых вибрирующими конструктивными элементами; составление, на базе разработанного метода, алгоритмов и программ, позволяющих проводить исследования амплитудно-частотных характеристик и резонансных форм колебаний пластин произвольной формы с учетом подкрепляющего набора ребер жесткости; исследование прохождения звуковых волн через пластину и расчет энергетических характеристик звукопроницаемости ограниченных пластин.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработан численно-аналитический метод расчета гидроупругих колебаний, звукоизлучения и звукопроницаемости ограниченных пластин, отличающийся от известных сравнительно простой;

- дана методика численного решения указанных задач для пластин сложной формы и пластин, подкрепленных ребрами жесткости, основанная на конечно-элементном анализе их деформирования;

- решены новые задачи о гидроупругих колебаниях трехслойных пластин;

- на основе разработанного метода проведено систематическое исследование резонансных режимов гидроупругих колебаний пластинчатых элементов конструкций в зависимости от их геомет-

рических и физических параметров;

- исследовано прохождение звуковых волн через пластину и приведен расчет энергетических характеристик звукопроницаемости ограниченных пластин.

Достоверность научных результатов и выводов работы обеспечивается строгостью постановки задач и математических методов, применяемых для их анализа; сравнением результатов, получаемых различными методами; совпадением решений, в частных случаях, с известными решениями и результатами других исследователей; численной проверкой сходимости методов расчета; соответствием полученных результатов физическому содержанию рассматриваемых задач, а также повторяемостью численных экспериментов на ЭВМ.

Практическая значимость. Предложенные в диссертационной работе алгоритмы расчета вынужденных колебаний и акустических характеристик тонкостенных элементов конструкций могут быть использованы в расчетной практике научно-исследовательских организаций и конструкторских бюро машиностроительной, химической, кораблестроительной и других отраслях народного хозяйства, занимающихся вопросами надежности и долговечности проектируемых изделий, а также вопросами акустики, борьбы с шумом и вибрациями.

Разработанные в диссертации методика, алгоритмы и программы внедрены в НИИ полимерных материалов г.Перми и используются при прочностных расчетах пластинчатых элементов конструкций при действии вибрационных нагрузок. Условный экономический эффект от внедрения составил 50 тыс. рублей.

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

- III Всесоюзной конференции "Прочность, жесткость и технологичность изделий из композитных материалов" (г.Запорожье, 1989 г.);
- ежегодных научных конференциях Запорожского государственного университета (г.Запорожье, 1988-1991 гг.);
- межкафедральном тематическом семинаре по специальности 01.02.04 - "Механика деформируемого твердого тела" Запорожского машиностроительного института (г.Запорожье, 1991 г.);
- семинаре кафедры теории упругости и пластичности Нижегородского государственного университета им.Н.И.Лобачевского (г.Нижний Новгород, 1991 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 работ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения.

Общий объем - 180 с., включая 101 с. машинописного текста, 62 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 114 наименований, приложение на 1 с.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано краткое содержание диссертационной работы, излагается научная новизна исследования, отмечены достоверность и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе содержится анализ современного состояния вопроса, дан краткий обзор работ, посвященных вынужденным гармоническим колебаниям ограниченных пластин, взаимодействующих со средой. Из обзора следует, что в настоящее время сравнительно полно исследованы задачи о колебании пластин, контактирующих

с жидкостью лишь для простейших случаев (например, для однородной бесконечной пластины, погруженной в жидкость или для ограниченных пластин простой геометрической формы, когда распределение колебательной скорости является заданным). Учет влияния среды приводит к интегро-дифференциальным уравнениям или к бесконечной алгебраической системе, решаемым численно. Громоздкость решения не позволяет провести систематические исследования колебаний пластин и их акустических характеристик.

Анализ состояния вопроса позволил поставить цели и задачи исследования, которые приведены в первой главе.

Во второй главе предлагается численно-аналитический метод решения и проводится систематическое исследование одномерных (плоских и осесимметричных) задач о вынужденных колебаниях ограниченных пластин, закрепленных в бесконечном абсолютно жестком экране, разделяющем два акустических полупространства.

Рассмотрены вынужденные гармонические колебания одномерной упругой пластины-полосы и круглой пластины под действием осесимметричной нагрузки.

Математически поставленная задача сводится к решению уравнения изгиба пластины, которое без временного множителя имеет вид:

$$DLW - \rho h \omega^2 W = q + p \quad (I)$$

где W - прогиб пластины, q - возбуждающая нагрузка,
 ω - частота возбуждения, p - реакция среды, D - цилиндрическая жесткость, ρh - погонная масса пластины,
 L - линейный оператор.

$$L = \frac{d^4}{dx^4}, \quad \text{или} \quad L = \left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \right) \left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \right)$$

Используя интеграл Гюйгенса, реакцию среды в любой точке пластины можно определить:

$$p(x) = \frac{i\omega^2 \rho_0 n}{2} \int_0^l w(x) H_0^{(1)}(k_0 |x-x_1|) dx, \quad (2)$$

$H_0^{(1)}$ - функция Ханкеля первого рода нулевого порядка.

Решение задачи строится в виде ряда по собственным формам колебаний пластины в вакууме, соответствующим заданным краевым условиям. При разложении в аналогичный ряд неизвестной реакции жидкости принимается ее кусочно-линейная аппроксимация по длине пластины. Подставляя эти ряды в уравнение (1), получим выражение для прогиба пластины, содержащее значение реакции жидкости в ее узлах. Далее, используя интеграл Гюйгенса (2), осуществляется переход к конечной системе линейных алгебраических уравнений относительно звуковых давлений в ряде фиксированных точек пластины.

Разработанный метод был развит и обобщен на случай взаимодействия с жидкостью трехслойных пластин, широко используемых в технике и строительстве.

Решение строится с использованием двух различных теорий трехслойных пластин - упрощенной и уточненной.

В первом случае деформирование пластины, с опущенным временным множителем, описывается уравнениями, построенными без учета поперечной сжимаемости заполнителя на основе гипотезы ломаной линии относительно распределения тангенциальных перемещений по ее толщине.

Решение системы, удовлетворяющее условиям свободного опирания торцов, ищется в виде тригонометрических рядов. Аналогичными рядами представляются функции $q(x)$ и $p(x)$, последняя предварительно аппроксимируется кусочно-линейной функцией. Как и для однородной пластины, определяются коэффициенты разложения в ряд функции прогиба через неизвестные значения реакции среды. Отличие лишь в том, что аналитические выражения этих коэффициентов получаются при решении системы линейных алгебраических уравнений третьего порядка. И, используя интеграл Гюйгенса, осуществляется переход к конечной системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных звуковых давлений в узлах пластины.

Во втором случае использовались уравнения динамической теории упругости (для заполнителя) в сочетании с уравнениями тонких пластин (для обшивок). Постоянные интегрирования при этом находят из условия непрерывности перемещений и напряжений на границах сопряжения слоев. Узловые значения звукового давления на поверхности пластины определяются как и ранее.

В заключении главы приводятся и обсуждаются численные результаты расчетов для пластины-полосы, круглой и трехслойной пластин в виде графиков.

На рис. I приведены частотные зависимости действительной и мнимой составляющих прогибов трехслойной пластины-полосы в центре на первой и второй резонансных частотах при одностороннем контакте с водой. На пластину действует возбуждающая линейная сила $F \delta(x - e/2)$, где $F = 10^3$ н/м

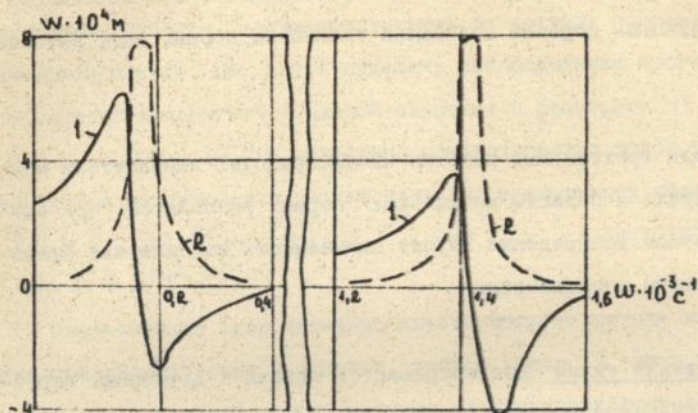


Рис. I

На основе анализа результатов сделаны выводы:

- 1) при определенных частотах возбуждения пластины мнимая часть прогиба достигает максимума, в то время как действительная - меняет знак;
- 2) этот эффект соответствует последовательным резонансам, смещенным, по сравнению со случаем ее колебания в вакууме, в область низких частот;
- 3) величина этого смещения зависит от геометрических и физических параметров пластины и увеличивается с уменьшением ее жесткости и массы;

4) резонансные формы колебаний совпадают с соответствующими собственными формами колебаний только на первых двух резонансах;

5) для трехслойных пластин несжимаемость заполнителя можно пренебречь в области нескольких первых резонансов. При высокочастотном возбуждении неучет сжимаемости заполнителя приводит к большим погрешностям.

В третьей главе рассматриваются задачи о двумерных гармонических гидроупругих колебаниях прямоугольной и неосесимметричные колебания круглой пластины. Идея метода решения этих задач сохранялась, но в результате перехода к конечной системе линейных алгебраических уравнений получаются двойные суммы, так как дискретизация пластины происходит в двух направлениях.

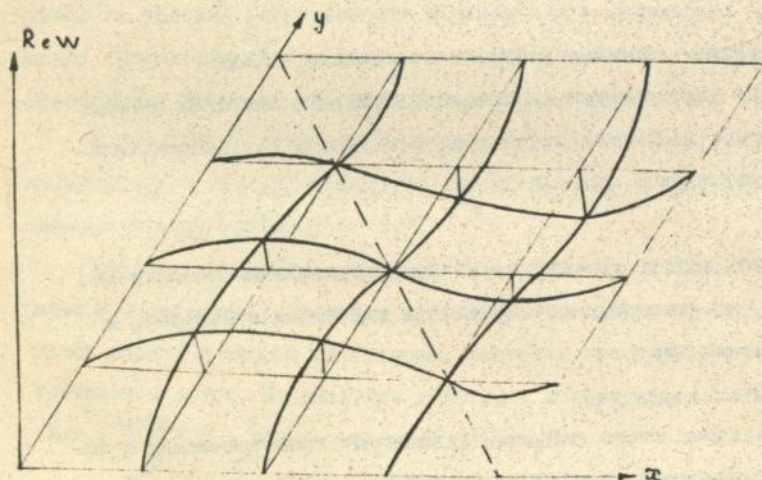


Рис. 2

Отмеченные ранее закономерности гармонических колебаний ограниченных пластин, взаимодействующих со средой, сохраняются и в двумерном случае. На рис.2 показано распределение прогибов по поверхности квадратной стальной пластины с размерами $a = b = 0,5$ м, $h = 10^{-2}$ м. Пластина контактирует с водой одной стороной и подвергается воздействию сосредоточенной силы

$$F \delta(x - \frac{a}{4}) \delta(y - \frac{b}{4}), \quad (F = 10 \text{ н}) \quad \text{с частотой}$$

$$\omega = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}.$$

Предложенная идея численно-аналитического метода использована при рассмотрении и пластин сложной формы. В связи с этим разработан численный метод решения указанного класса задач на основе метода конечных элементов (МКЭ).

При выводе уравнений динамики отдельного элемента применяется принцип виртуальных перемещений. Особенность подхода в данной работе заключается в том, что для вычисления матрицы жесткости используем кубическую аппроксимацию прогиба на элементах, а при вычислении матрицы массы и вектора нагрузки – линейную, что оправдано с точки зрения получения одинаковой точности аппроксимации всех слагаемых функционала полной энергии пластины.

Важным достоинством МКЭ является возможность достаточно простого учета расположенного на пластине подкрепляющего набора ребер жесткости.

В работе предложена модификация конечно-элементного решения задач о гидроупругих колебаниях конструкций, подкрепленных набором ребер жесткости. Суть которой, в применении подкрепления одной из сторон треугольного элемента ребром жесткости бабочного типа.

Нормальные и тангенциальные перемещения по толщине ребра получаются на основании известных соотношений теории тонких

стержней.

Следует отметить, что при этом не учитывается то обстоятельство, что вследствие смещения нейтральной поверхности часть срединной плиты, находящаяся у ребра, включается в работу на сжатие или растяжение.

Используя перемещения, определяются матрицы жесткости и массы элемента ребра. Добавляя к матрицам массы и жесткости пластины, найденные матрицы массы и жесткости балочных элементов, получается уравнение движения подкрепленной пластины.

С учетом подкрепляющего набора ребер жесткости исследованы амплитудно-частотные характеристики и резонансные формы колебаний пластин.

В четвертой главе показана возможность использования предложенного метода для расчета звуковых полей, создаваемых в среде вибрирующими конструктивными элементами, а также при оценке их акустических характеристик.

Звуковое давление на поверхности пластин, возбуждаемых нормальной нагрузкой, определяется непосредственно из решения систем, полученных во второй и третьей главах. На основании этих результатов проведен анализ звукового давления на поверхности ограниченных пластин.

На рис.3 показано пространственное распределение звукового давления, создаваемого алюминиевой пластиной-полосой, по длине пластины с заходом на экран для первой $\omega_1 = 122 \text{ с}^{-1}$ резонансной частоты.

Кривая 1 - давление на поверхности пластины, кривые 2 и 3 - давление при удалении от поверхности пластины соответственно на расстояния $z = l/2$ и $z = l$.

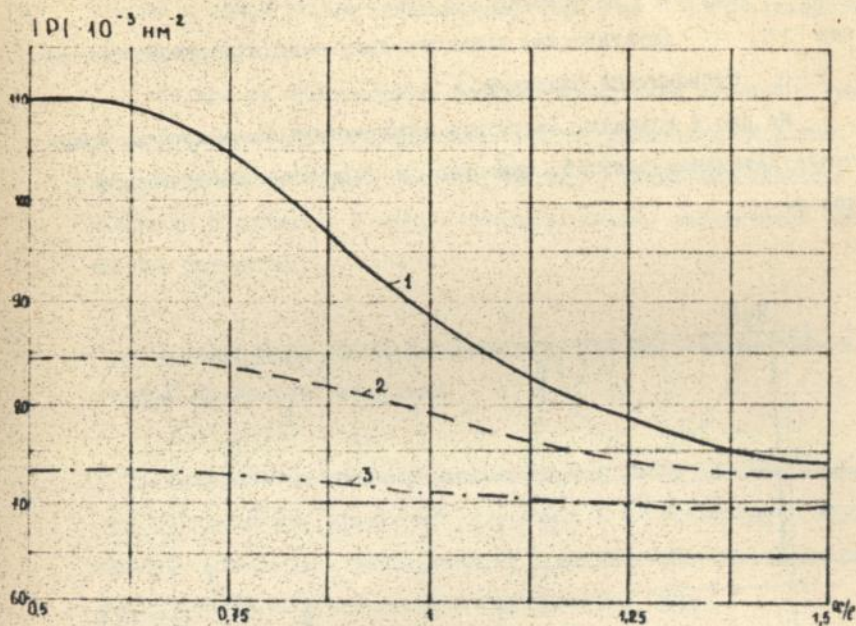


Рис.3

Из рисунка видно, что при удалении от поверхности пластины, зависимости постепенно принимают вид пологих кривых, приблизительно параллельных плоскости пластины.

В приложениях большой интерес представляет акустическая мощность излучения, которую можно вычислить по известному распределению звукового давления на поверхности пластины и ее колебательной скорости.

Зная акустическую мощность, излучаемую на единицу длины пластины в полупространство $Z > 0$, можно определить коэф-

коэффициент излучения по формуле $S = 10 \lg (N/N_0)$,

где N_0 - акустическая мощность излучения в полупространство $Z > 0$ бесконечной пластины.

На рис. 4 показаны частотные зависимости коэффициента излучения пластинной-полосой, при одно- и двухстороннем контакте с водой.

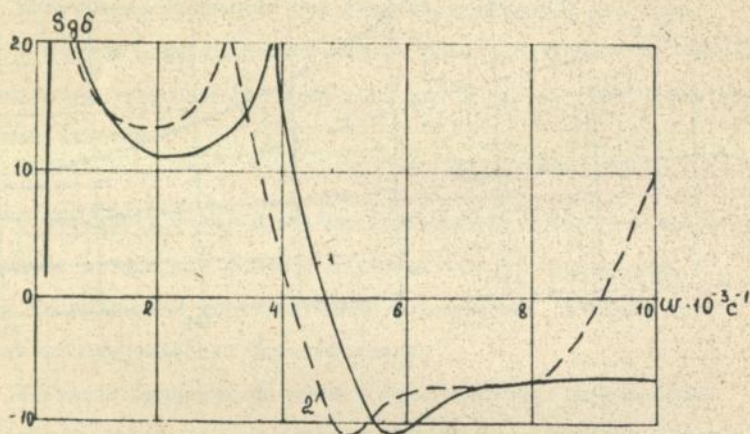


Рис. 4

Анализ результатов показывает, что изменение размеров пластины, условий ее нагружения и закрепления краев сказывается на числе и положении максимумов излучения. Вне резонансных зон с ростом частоты акустическая мощность излучения ограниченной пластины становится меньше (при контакте с водой) или близкой (при колебаниях в воздухе) к акустической мощности бесконечной пластины.

В этой же главе рассмотрено прохождение звука через ограни-

ченные в одном и двух направлениях пластины и проанализирована их звукоизоляция.

На основе МКЭ получены формулы вычисления звукового давления на поверхности ограниченных пластин произвольной формы, с подкрепляющим набором ребер жесткости, а также акустической мощности излучения. В работе приведен анализ результатов численных расчетов.

В заключении сформулированы основные результаты работы, которые состоят в следующем:

- разработан численно-аналитический метод расчета вынужденных гармонических колебаний, излучения и передачи звука ограниченными пластинами, закрепленными в бесконечном абсолютно жестком экране на границе раздела акустических сред;

- построены разрешающие системы для одномерных и двумерных колебаний ограниченных пластин, в частности: пластины-полосы, круглой при осесимметричных и неосесимметричных колебаниях, трехслойной пластины-полосы с учетом и без учета сжимаемости заполнителя, прямоугольной пластины;

- установлено влияние параметров пластины, свойств среды, характера и частоты возбуждения на деформирование пластины;

- исследовано изменение пространственного распределения составляющих давления при удалении от поверхности пластины;

- изучена зависимость гидроупругих колебаний трехслойной

пластины-полосы от несимметрии строения и сжимаемости заполнителя ;

- с использованием МКЭ разработан алгоритм и получены разрешающие системы для задач о вынужденных колебаниях пластинчатых конструкций с подкрепляющим набором ребер жесткости.

В приложении приведены документы, подтверждающие внедрение результатов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах :

1. Применение метода конечных элементов (МКЭ) к расчету вынужденных колебаний пластин в жидкости. Сб. "Прикладные задачи математики и физики", г.Киев УМК ВО, 1988, с.4-9 (в соавторстве).

2. Одномерные колебания и акустические свойства ограниченных пластин, взаимодействующих со средой (Запорожский гос.ун-т. Запорожье, 1989. 54 с. Библиогр. 7 назв. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 6.1.1989. № 200 Ук-89 (в соавторстве)).

3. Динамика и акустические свойства ограниченных трехслойных пластин, взаимодействующих со средой. //Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Прочность, жесткость и технологичность изделий из композитных материалов". Запорожье, 1989. С. 27-28 (в соавторстве).

4. Вынужденные колебания и акустические свойства прямоугольной пластины, взаимодействующей со средой. //Изв. АН СССР.

Механика твердого тела. - 1990. - № 4. - С.104-109 (в соавторстве).

6. Вынужденные колебания упругой полосы, взаимодействующей с жидкостью. //Динамика и прочность машин. - Гесп. межведомств. сб. при ХГУ, г.Львов. - 1990. - вып.51. - С.44-48 (в соавторстве).

6. Колебания ограниченных трехслойных пластин, контактирующих с жидкостью. //Прикладная механика. Киев. - 1991, том 27, № 3. - С.55-53 (в соавторстве).

7. акустическое поле упругой полосы, взаимодействующей с жидкостью. //Сб. "математические методы и физико-механические поля". Львов. - 1991, вып.33. - С.45-48 (в соавторстве).

(Подпись)

Подписано к печати 04.07.91, формат 60x84 1/16.

Заказ № 173. Тираж 100 экз. Печ.л. 0,98. Бесплатно.

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

АНБ им. В. Стефаника
АН УРСР

466687

AB 25.366

~~U~~

~~522~~