

Министерство образования и науки Российской Федерации
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Национальный исследовательский университет

Учебно-научный и инновационный комплекс
«Модели, методы и программные средства»

Кудин М.В.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АКУСТИКИ В ПРОГРАММНОМ
КОМПЛЕКСЕ ANSYS
Электронное методическое пособие

Блок мероприятий 2. Повышение эффективности научно-инновационной деятельности

Учебная дисциплина: «Модели механики деформируемого твердого тела»

Специальность, направление: 01 04 00.62 «Прикладная математика и информатика»

Нижний Новгород
2011

УДК 539.3
ББК 22.2

Кудин М.В. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АКУСТИКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS: Электронное методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. – 27 с.

Одобрено решением Совета исследовательской школы «Компьютерная и экспериментальная механика».

В пособии изложены методики расчета задач акустики в программном пакете ANSYS. В качестве примера, разобрано полное решение задачи о пульсирующей сфере. Приводится теория в объеме, предусмотренном программой по курсу «Модели механики деформируемого твердого тела». Электронное методическое пособие предназначено для студентов ННГУ, обучающихся по направлению подготовки 010400.62 «Прикладная математика и информатика».

УДК 539.3
ББК 22.2

© Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2011

Содержание

1. Теоретические основы акустической среды.....	4
1.1. Определяющие уравнения	4
1.2. Дискретизация волнового уравнения	5
1.3. Вывод матриц акустической среды	6
1.4. Поглощение акустической волны давления. Диссипация за счёт демпфирования на границе	7
1.5. Задачи взаимодействия акустической среды и твёрдого тела	7
1.6. Результаты расчёта акустического анализа. Градиент Давлений. Скорость. Звуковое давление.....	8
2. Реализация в ANSYS.....	10
2.1. Прикладное значение акустических задач.	10
2.2. Типы Акустического анализа.....	10
2.3. Решение акустических задач.....	10
2.4. Типы конечных элементов. Константы элементов и материалов.	11
2.4. Разбиение на конечные элементы.....	12
2.5. Нагрузки.....	13
2.6. Просмотр результатов	14
3. Пример решения задачи акустики в ANSYS.	15
3.1. Условие задачи	15
3.2. Построение конечно-элементной модели	15
3.3. Задание граничных условий и решение задачи.	18
3.4. Просмотр результатов	19
3.5. Командный файл задачи.....	22
Список литературы	26

1. Теоретические основы акустической среды.

1.1. Определяющие уравнения

В акустической среде, уравнения динамики необходимо рассматривать вместе с уравнениями импульса и неразрывности. Для вывода волнового уравнения акустической среды используются следующие допущения:

- Среда сжимаемая (плотность изменяется за счёт изменения давления).
- Среда не вязкая (нет диссипации)
- Нет потока среды через поверхность
- Средняя плотность является единой на всей среде

Рассмотрим идеальную сжимаемую жидкость в объёме Ω с границей Γ :

$$P = P(r) \quad (1)$$

где $P=P(x,y,z,t)$ - акустическое давление, r - плотность. Это уравнение называют уравнением состояния жидкости. Кроме него в систему уравнений, описывающих колебания идеальной сжимаемой жидкости, войдут:

$$r \frac{dV}{dt} = -gradP \quad (2)$$

уравнение движения Эйлера;

$$\frac{\partial r}{\partial t} + div(rV) = 0 \quad (3)$$

уравнение неразрывности. В данных уравнениях:

V - вектор скорости,

t - время.

Построенная система уравнений даёт уравнение, которое имеет вид:

$$c^2 \Delta P - \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

где $c = \sqrt{\frac{k}{r}}$ - скорость звука в жидкой среде,

k - модуль объёмной упругости жидкости,

r - средняя плотность жидкости.

Уравнение (1) называется волновым уравнением распространения звука в жидкости.

Для гармонически изменяющегося давления:

$$P = \bar{P} e^{i\omega t} \quad (5)$$

где \bar{P} - амплитуда давления,

$i = \sqrt{-1}$ - мнимая единица,

$\omega = 2\pi f$,

f - частота колебаний давления.

Уравнение (4) превращается в уравнение Гельмгольца.

$$\frac{w^2}{c^2} \bar{P} + \Delta \bar{P} = 0 \quad (6)$$

1.2. Дискретизация волнового уравнения

Для дискретизации уравнения (4) необходимо использовать матричные операторы градиент и дивергенция.

$$\nabla \cdot () = \{L\}^T = \left| \begin{array}{ccc} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{array} \right| \quad (7)$$

$$\nabla () = \{L\} \quad (8)$$

Уравнение (4) переписывается в следующем виде:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla \cdot \nabla P = 0 \quad (9)$$

Используя матричные обозначения, приведенные в выражениях (7-8) уравнение (9) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \{L\}^T \{L\} P = 0 \quad (10)$$

Умножая уравнение (10) на виртуальное изменение давления и интегрируя по объёму V и применяя теорему Гаусса- Остроградского:

$$\int_V \frac{1}{c^2} dP \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} dV + \int_V \{L\}^T dP \{L\} P dV = \int_{\Gamma} \{n\}^T dP \{L\} P d\Gamma \quad (11)$$

где dP - виртуальное изменение давления,

Γ - поверхности, для которых существует производная давления по нормали к ним,

$\{n\}$ - нормаль к поверхности Γ .

В задачах взаимодействия жидкость (акустическая среда) твёрдое тело, поверхность Γ рассматривается, как граничная между разными средами. Для упрощения дальнейших выкладок, применим соотношение связи нормального градиента давлений, с нормальными ускорениями твёрдого тела на границе:

$$\{n\}^T \nabla P = -r \{n\} \frac{d^2 \{u\}}{dt^2} \quad (12)$$

где $\{u\}$ - вектор перемещений твёрдого тела.

В матричном выражении уравнение (12) переписывается:

$$\{n\}^T \{L\} P = -r \{n\}^T \frac{d^2 \{u\}}{dt^2} \quad (13)$$

Подставляя выражение (13) в выражение (11) получим:

$$\int_V \frac{1}{c^2} dP \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} dV + \int_V \{L\}^T dP \{L\} P dV = - \int_{\Gamma} r dP \{n\}^T \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} d\Gamma \quad (14)$$

1.3. Вывод матриц акустической среды

Уравнение (14) содержит давление P и смещения компонентов перемещений, в качестве зависимых переменных. Для реализации метода конечного элемента необходимо ввести функции формы, при помощи которых значения давления и перемещений внутри конечного элемента выражаются через его узловые значения:

$$P = \{N\}^T \{P_e\} \quad (15)$$

$$U = \{N'\}^T \{U_e\} \quad (16)$$

где $\{N\}$ - вектор функций форм для определения давления,

$\{N'\}$ - матрица функций форм для определения перемещений,

$\{P_e\}$ - вектор узловых значений давления,

$\{U_e\} = \{U_{ex}\}, \{U_{ey}\}, \{U_{ez}\}$ - вектор узловых значений перемещений.

Учитывая выражения (15) и (16), производные переменных и виртуальное изменение давления определяются как:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \{N\}^T \{\ddot{P}_e\} \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \{N'\}^T \{\ddot{U}_e\} \quad (18)$$

$$dP = \{N\}^T \{dP_e\} \quad (19)$$

Применим оператор $\{L\}$ к матрицам функций форм:

$$\{B\} = \{L\} \{N'\}^T \quad (20)$$

Подставляя (15), (16) в уравнение (14) и учитывая (17)-(20) получим:

$$\begin{aligned} & \int_V \frac{1}{c^2} \{dP_e\}^T \{N\} \{N\}^T dV \{\ddot{P}_e\} + \int_V \{dP_e\}^T \{B\}^T \{B\} dV \{P_e\} + \\ & + \int_\Gamma r \{dP_e\}^T \{N\} \{n\}^T \{N'\}^T d\Gamma \{\ddot{U}_e\} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Поскольку виртуальное изменение давления не равно нулю, то (21) переписывается:

$$\begin{aligned} & \int_V \frac{1}{c^2} \{N\} \{N\}^T dV \{\ddot{P}_e\} + \int_V \{B\}^T \{B\} dV \{P_e\} + \\ & + \int_\Gamma r \{N\} \{n\}^T \{N'\}^T d\Gamma \{\ddot{U}_e\} \end{aligned} \quad (22)$$

Уравнение (22) может быть переписано в матричном виде:

$$\{M_e\} \{\ddot{P}_e\} + \{K_e\} \{P_e\} + r \{R_e\} \{\ddot{U}_e\} = 0 \quad (23)$$

где $\{M_e\} = \int_V \frac{1}{c^2} \{N\} \{N\}^T dV$ - матрица масс акустической среды,

$\{K_e\} = \int_V \{B\}^T \{B\} dV$ - матрица жёсткости акустической среды,

$\{R_e\} = \int_\Gamma \{N\} \{n\}^T \{N'\}^T d\Gamma$ - связующая матрица масс акустической среды.

1.4. Поглощение акустической волны давления. Диссипация за счёт демпфирования на границе

Для учета диссипации энергии за счет демпфирования, если оно присутствует на границы жидкости, уравнение (14) переписывается:

$$\int_V \frac{1}{c^2} dP \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} dV + \int_V dP \{L\}^T (\{L\}P) dV + \int_\Gamma dP \left(\frac{r}{rc} \right) \frac{1}{c} \frac{\partial P}{\partial t} d\Gamma = 0 \quad (24)$$

где r - диссипация на границе.

Введём обозначение:

$$D = \int_\Gamma dP \left(\frac{r}{rc} \right) \frac{1}{c} \frac{\partial P}{\partial t} d\Gamma \quad (25)$$

С учётом конечно-элементных соотношений получим:

$$D = \int_\Gamma \{dP_e\}^T \{N\} \left(\frac{r}{rc} \right) \frac{1}{c} \{N\}^T d\Gamma \left\{ \frac{\partial P_e}{\partial t} \right\} \quad (26)$$

Введём обозначение:

$$b = \frac{r}{rc} \quad (27)$$

$$\left\{ \frac{\partial P_e}{\partial t} \right\} = \{ \dot{P}_e \} \quad (28)$$

Выражение (26) переписывается с учётом (27)-(28):

$$D = \{dP_e\}^T \frac{b}{c} \int_\Gamma \{N\} \{N\}^T d\Gamma \{ \dot{P}_e \} \quad (29)$$

Уравнение (24) в матричном виде будет выглядеть следующим образом:

$$\{M_e\} \{ \dot{P}_e \} + \{C_e\} \{ \dot{P}_e \} + \{K_e\} \{P_e\} + r \{R_e\} \{ \dot{P}_e \} = 0 \quad (30)$$

Где $\{C_e\} = \frac{b}{c} \int_\Gamma \{N\} \{N\}^T d\Gamma$ - матрица демпфирования акустической среды.

1.5. Задачи взаимодействия акустической среды и твёрдого тела

Для того, чтобы полностью описать задачи взаимодействия, давление жидкости, действующее на границе, добавляется в правую часть уравнения движения твёрдого тела. Этот эффект отражен в элементах FLUID29 и

FLUID30 только если установлена опция KEYOPT(2) = 0. Уравнения движения твёрдого тела будут выглядеть следующим образом:

$$\{M_{eu}\}\{\ddot{U}_e\} + \{C_{eu}\}\{\dot{U}_e\} + \{K_{eu}\}\{U_e\} = \{F_e\} + \{F_{ep}\} \quad (31)$$

Где $\{F_{ep}\} = \int_{\Gamma} \{N'\} P \{n\} d\Gamma$,

$\{N'\}$ - матрица функций форм перемещений,

$\{n\}$ - нормаль к поверхности Γ .

Учитывая аппроксимацию давления через функции формы, получим:

$$\{F_{ep}\} = \int_{\Gamma} \{N'\} \{N\}^T \{n\} d\Gamma \{P_e\} \quad (32)$$

Сравнивая интеграл в (32) с уравнением (23), становится ясно, что:

$$\{F_{ep}\} = \{R_e\} \{P_e\} \quad (33)$$

где $\{R_e\} = \int_{\Gamma} \{N'\} \{N\}^T \{n\} d\Gamma$.

Уравнение (31) переписется:

$$\{M_{eu}\}\{\ddot{U}_e\} + \{C_{eu}\}\{\dot{U}_e\} + \{K_{eu}\}\{U_e\} - \{R_e\}\{P_e\} = \{F_e\} \quad (34)$$

Таким образом, (30) и (34) образуют совместную систему уравнений.

1.6. Результаты расчёта акустического анализа. Градиент Давлений. Скорость. Звуковое давление.

Градиенты давлений оцениваются в центре тяжести каждого элемента через его узловые значения:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\}^T \{P_e\} \quad (35)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\}^T \{P_e\} \quad (36)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \left\{ \frac{\partial N}{\partial z} \right\}^T \{P_e\} \quad (37)$$

Скорости жидкости рассчитывается в центре тяжести каждого элемента только для гармонического анализа:

$$V_x = \frac{i}{rw} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (38)$$

$$V_y = \frac{i}{rw} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (39)$$

$$V_z = \frac{i}{rw} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (40)$$

где $i = \sqrt{-1}$ - мнимая единица,

$$\omega = 2\pi f,$$

f- частота колебаний давления.

Уровень акустического давления определяется следующим образом:

$$L_{sp} = 20 \text{Log} \left(\frac{P_{rms}}{|P_{ref}|} \right) \quad (41)$$

где L_{sp} - уровень акустического давления,

Log- десятичный логарифм,

P_{ref} - базовое давление,

$$P_{rms} = \frac{P}{\sqrt{2}}.$$

2. Реализация в ANSYS.

2.1. Прикладное значение акустических задач.

Акустика применяется в исследовании генерации, распространения, поглощения и отражения звуковых волн давления. Приведём некоторые приложения акустики:

- Акустические радары
- Разработка дизайна концертных залов, с целью равномерного распределения звукового давления
- Минимизация шума в магазинах
- Подавление шума в автомобиле
- Подводная акустика
- Дизайн колонок, динамиков корпусов, акустические фильтры, шумоглушители, и многие другие подобные устройства
- Геофизическая разведка

2.2. Типы Акустического анализа

Среди множества акустических задач, типичный интерес представляет нахождение распределения давления в жидкости для разных частот, градиентов давления, скорости частиц, уровня звукового давления, а также, рассеяния и дифракции, передачи, излучения, ослабления и рассеяния акустических волн.

В ANSYS программа предполагает, что жидкость не сжимаемая, и позволяет лишь сравнительно небольшие изменения давления по отношению к среднему значению давления. Кроме того, предполагается, что жидкость не течет, и невязкая.

2.3. Решение акустических задач

В ANSYS можно решить различные задачи акустики, выполняя гармонический анализ отклика системы. В процессе решения находится распределение давления в жидкости от гармонического (по синусоиде) воздействия. Указав диапазон частот для нагрузки, можно наблюдать распределение давления на различных частотах. Также можно выполнить модальный анализ и анализ переходных процессов.

Порядок решений акустического анализа состоит из трех основных этапов:

- Построение модели
- Задание граничных условий, нагрузок и получение решения.
- Просмотр результатов

2.4. Типы конечных элементов. Константы элементов и материалов.

Четыре типа элемента в ANSYS предназначены для акустического анализа: FLUID29 и FLUID30 используются для моделирования жидкости, размерность 2-D и 3-D соответственно. Элементы FLUID129 и FLUID130 являются дружественными для FLUID29 и FLUID30, используются для продления решения на бесконечность.

Элементы FLUID29 и FLUID30 могут находиться в контакте с твёрдотельными элементами (либо внутри или вне структуры), например с PLANE42, SOLID45, и т.д.

Элементы FLUID129 и FLUID130 могут находиться в контакте только с FLUID29 и FLUID30 соответственно.

Для акустических элементов, которые находятся в контакте с твёрдотельными, обязательно нужно использовать опцию элементов KEYOPT(2)=0 (разрешение взаимодействия). Это приводит к несимметричному элементу матрицы. Для всех других акустических элементов, нужно установить KEYOPT(2) = 1, что позволит получить симметричный элемент матрицы. Симметричные матрицы требуют гораздо меньше места в памяти и машинного времени, так что необходимо использовать их там, где это возможно.

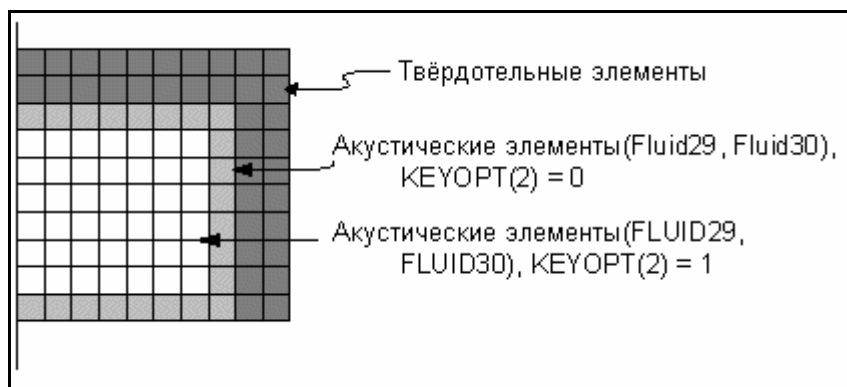


Рис.1. Иллюстрация правильного использования опций акустических элементов, с целью уменьшения машинного времени решения

При решении акустических задач в ANSYS необходимо вносить следующие значения констант материала для акустических элементов:

- DENS- плотность жидкости,
- SONC- скорость звука.

Если существует поглощение звука на границе раздела сред, то используется константа MU, чтобы указать границы допуска β (коэффициента поглощения). Значения β обычно определяется из экспериментальных измерений.

При использовании FLUID129 и FLUID130, граница основной сетки конечных элементов должна быть круглой (для 2-D и осесимметричных) или сферической (для 3-D). Радиус окружности или сферической границы ограниченной области, а также координаты центра окружности или сферы, должны быть указаны в константах элемента.

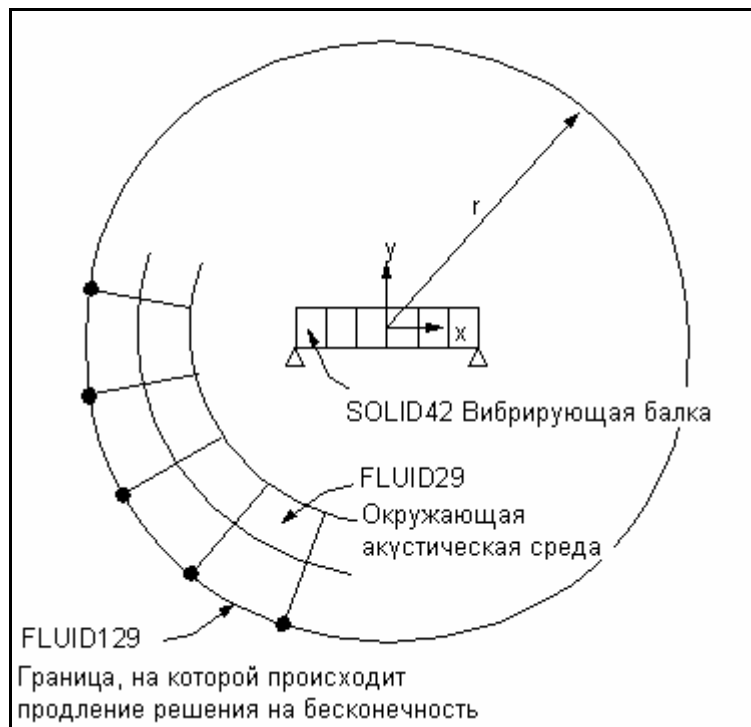


Рис.2 Продление решения на бесконечность.

2.4. Разбиение на конечные элементы.

При решении данного класса задач необходимо выполнить ряд операций, для того чтобы акустическое и твёрдое тело взаимодействовали по общей границе. Для этого необходимо выбрать все узлы твёрдого тела, которые лежат на границе взаимодействия. Затем выбрать элементы акустического тела, которые лежат на этой же границе. После этого необходимо выполнить команду SF,all,FSI. Ниже на рис.3 приведён пример выполнения данной операции.

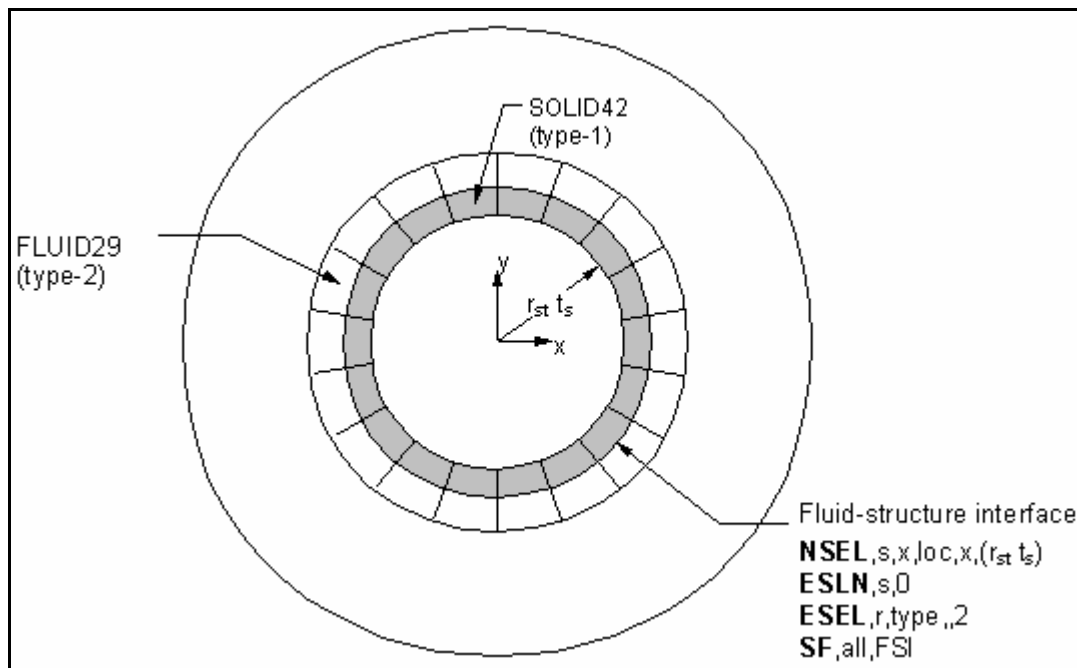


Рис.3. Моделирование взаимодействия акустических и твёрдотельных элементов.

2.5. Нагрузки

Возможны различные варианты приложения нагрузок. Для акустической среды возможно задание перемещений и давления на границе. Но гораздо удобней, с практической точки зрения, приложения произвольной нагрузки (силы, давления, перемещения) к твёрдому телу, контактирующему с акустической средой.

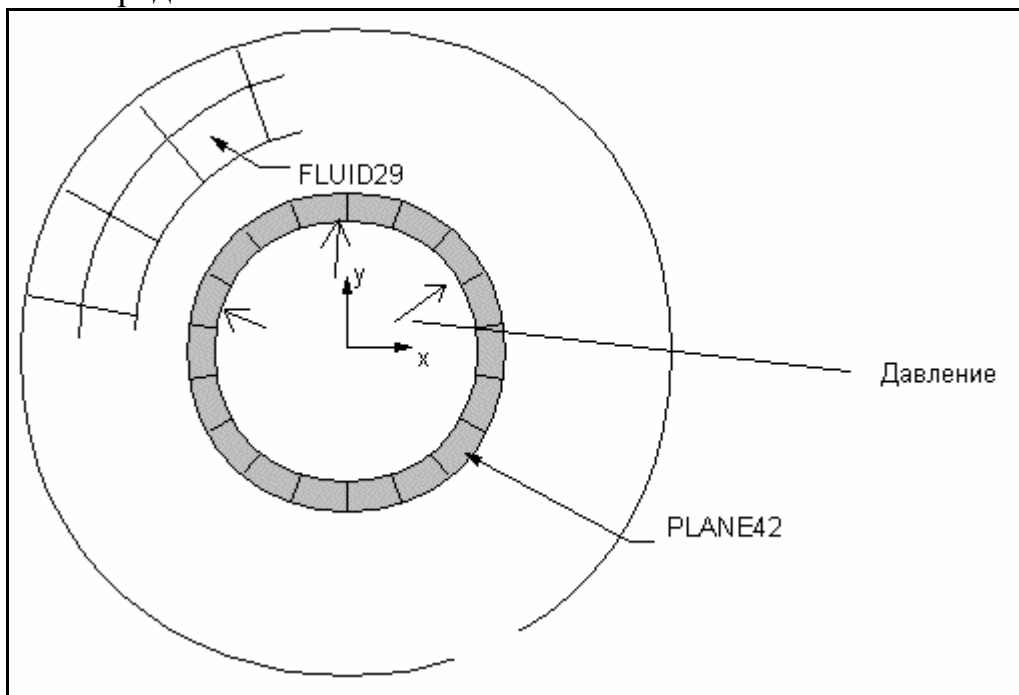


Рис.4 Пример задания нагрузок

На рис.4 приведён пример задания нагрузок в модели. К твёрдому телу (длинная труба) прикладывается внутреннее давление, изменяющееся по гармоническому закону. Данная нагрузка передаётся на акустическую среду, через границу раздела.

2.6. Просмотр результатов

В ANSYS программа записывает результаты от гармонического акустического анализа в структурный файл результатов Jobname.RST. Результаты состоят из следующих данных:

Первичные данные

-Узловые давления

-Узловые перемещения

Полученные данные

-Узловых и элементные градиенты давления

-Узловых и элементные напряжения

- Элементные силы

- Узловые силы реакции

Можно просматривать эту информацию, используя POST1 или POST26.

3. Пример решения задачи акустики в ANSYS.

3.1. Условие задачи

Для наглядного иллюстрирования возможностей пакета конечно-элементного моделирования ANSYS, рассмотрим подробное решение задачи о пульсирующей сфере.

Пульсирующей сферой называют шаровый излучатель, все точки которого колеблются по закону:

$$V_n(t) = V_0 e^{i\omega t} \quad (42)$$

где $V_n(t)$ - скорость колебания точек по нормали,

$\omega = 2\pi f$ -циклическая частота.

Звуковое поле вокруг сферы определяют волновым уравнением и граничным условием в сферических координатах:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (43)$$

а потенциал, скорость и звуковое давление выразятся формулами:

$$\Psi = \frac{1}{r} \cdot \frac{V_0 a^2}{1 + ika} \cdot e^{i(\omega t - kR)} \quad (44)$$

$$V = \frac{V_0 a^2}{1 + ika} \cdot \frac{1 + ikr}{r^2} e^{i(\omega t - kR)} \quad (45)$$

$$p = \frac{V_0 a^2}{1 + ika} \cdot r \cdot \frac{i\omega}{r} \cdot e^{i(\omega t - kR)} \quad (46)$$

где $a=1,01$ - радиус сферы,

$R=r-a$, r -радиус точки наблюдения,

k - волновое число,

$\omega = 0,1$ - частота,

$\rho = 0,9$ - плотность,

$V_0 = 1$ - начальная амплитуда скорости,

$c=7$ – скорость звука,

$R=10$ – дальняя граница.

3.2. Построение конечно-элементной модели

Задача будет решаться в осесимметричной постановке. Это делается для того, чтобы понизить размерность задачи.

Определяем константы:

a=1.01,
omega=0.1,
rho=0.9,
V=1,
C=7,
R=10,
E=10,
Nu=0.3.

Определяем типы конечных элементов: Main Menu>Preprocessor>Element Type->Add/Edit/Delete. Выбираем:

- 1.Plane42- твёрдотельный элемент (будет использоваться для задания нагрузок)
- 2.3.Fluid29- один тип из двух будет использоваться для контакта с твёрдым телом.
- 4.Fluid129- элемент продления решения на бесконечность.

Определяем опции элементов:

Для всех элементов опция K3- Axisymmetric (осесимметричное напряжённое состояние)

Для элемента 3.Fluid29 K2-Structure absent (контакт с твёрдым телом запрещён)

Определяем константы для элемента Fluid129: Main Menu> Preprocessor> Real Constants->Add->Fluid129:

Координаты центра окружности дальней границы (0,0). Радиус дальней границы R.

Определяем модели материалов: Main Menu> Preprocessor>Material Props->Material Models.

Для твёрдого тела: Structural->linear->elastic>isotropic. Задаём модуль упругости E и коэффициент Пуассона nu.

Для акустической среды необходимо создать ещё один материал: Material>New model, открыть вкладку Acoustics->Density, ввести плотность rho, затем открыть Acoustic>Sonic Velocity, ввести скорость распространения звука c.

Далее строим геометрическую модель. Для этого вводим координаты опорных точек: Main Menu> Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS:

- T.1.(0,0,0)
- T.2.(a,0,0)
- T.3.(a-0.06,0,0)
- T.4.(R,0,0)
- T.5.(0,a,0)
- T.6.(0,a-0.06,0)
- T.7.(0,R,0)

Следом строятся опорные линии и дуги окружностей: Main Menu> Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line, Main Menu> Preprocessor> Modeling>Create>Lines>Arcs>By End KPs&Rad.

По линиям строятся площади: Main Menu> Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>By Lines.

На рис.5 приведены опорные точки и линии с номерами. На рис.6 приведены построенные по ним площади.

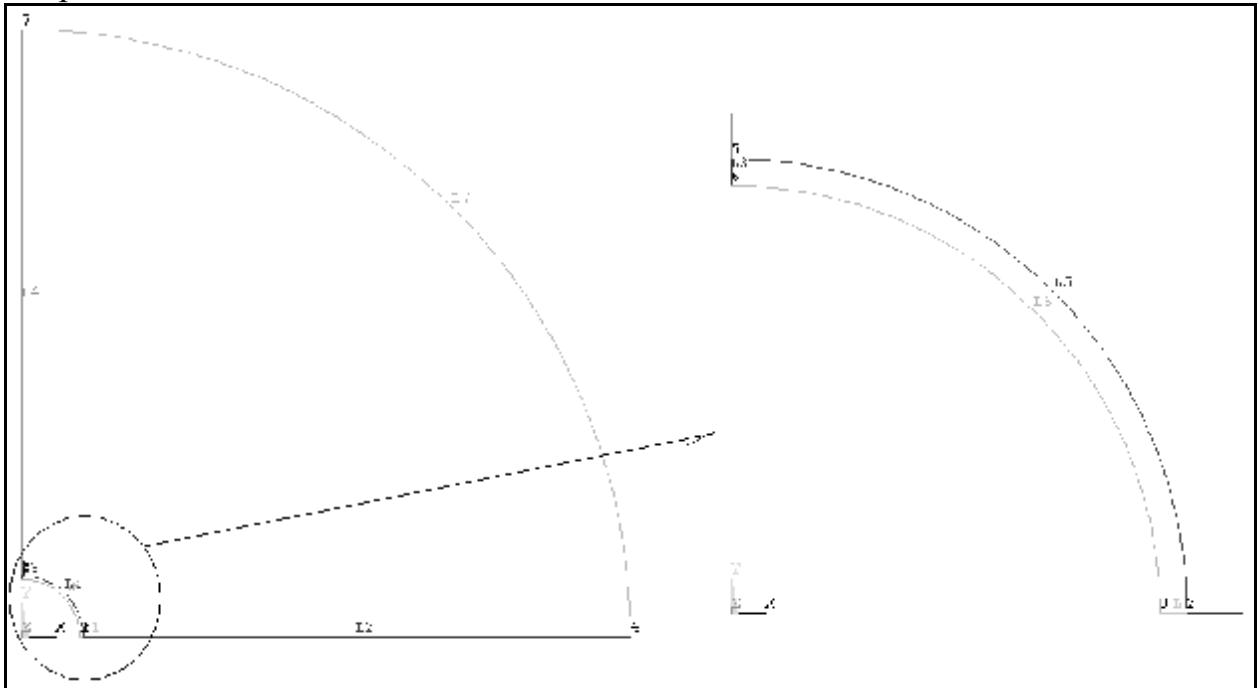


Рис.5 Опорные точки и линии

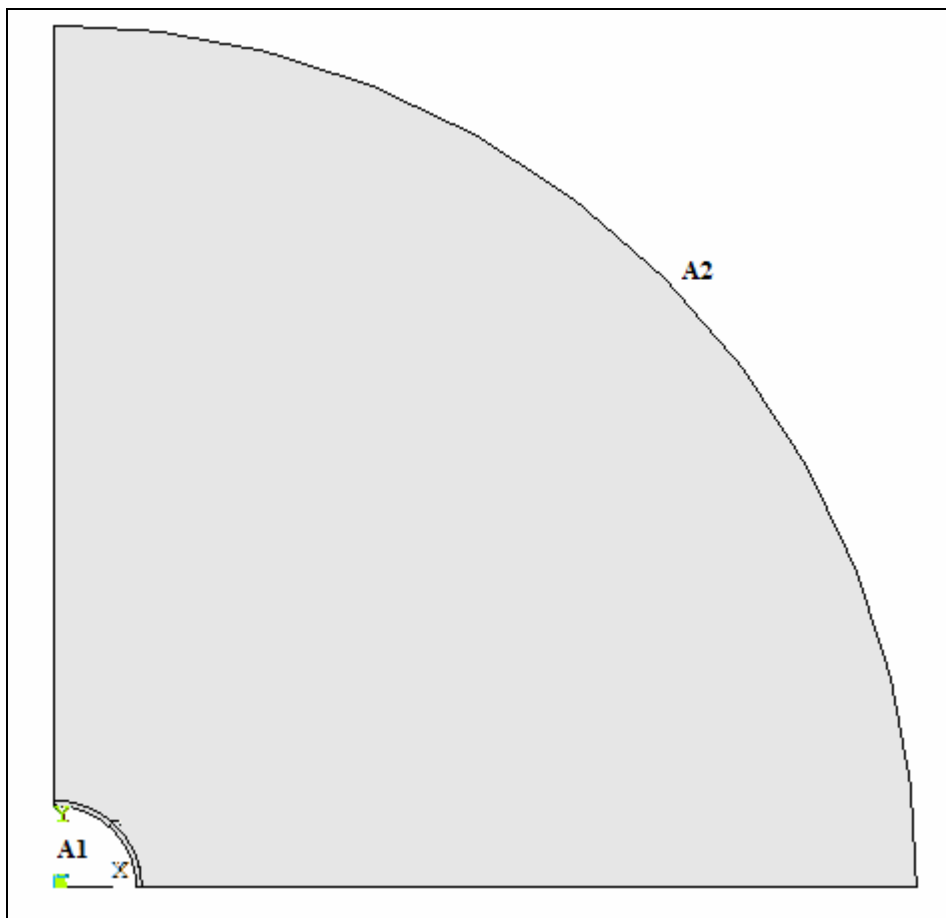


Рис.6 Площади

Необходимо присвоить площадям и линиям необходимые атрибуты: Main Menu> Preprocessor>Meshing>Mesh Tool. С помощью данного мастера задаём необходимые параметры:

1 площадь. Тип элемента 1.Plane42. Материал 1.

2 площадь. Тип элемента 3. Fluid29. Материал 2.

Линия на границе (L7). Тип элемента 4.Fluid129. Реальные константы 1.

Также задаём размеры вдоль линий с помощью мастера (Lines-Set). Строим сетку (Mesh-mapped). Также необходимо вручную выбрать акустические элементы, которые лежат около границы раздела 2-х сред (меню Select>entities) и назначить им тип элемента 2.Fluid29: Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move/Modify>Elements>Modify Atrib. Необходимо выбрать все элементы и задать им тип 2.

В результате получаем, конечно-элементную модель:

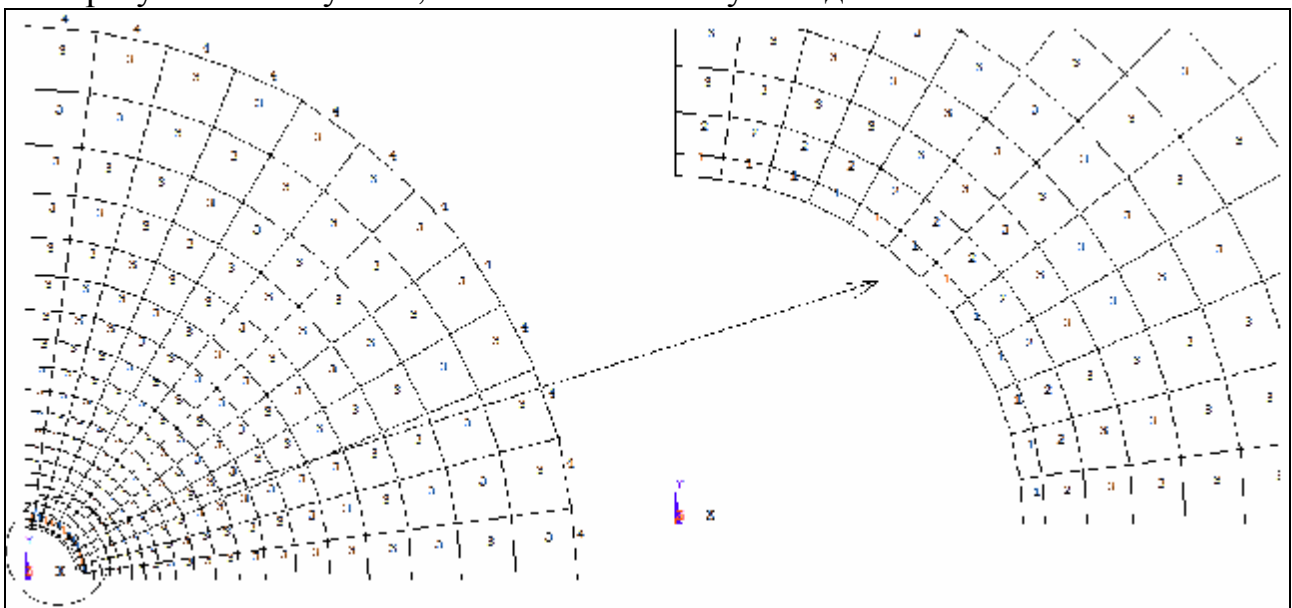


Рис.7 Конечно-элементная модель.

Переходим в цилиндрическую систему координат (команда CSYS,1). С помощью меню Select>entities, необходимо выбрать все узлы, лежащие на границе ($x=a$) и все акустические элементы типа 2. Затем выполнить команду SF,all,FSI для согласования решений на границе.

3.3. Задание граничных условий и решение задачи.

Определяем гармонический анализ: Main Menu >Solution>New Analysis>Harmonic. Определяем диапазон расчётных частот: Main Menu >Solution>Load Step Opt>Time/Frequenc>Freq and Substps. В нашем случае частота одна ω , но её величину необходимо поделить на 2π , т.к. частоты в ANSYS вводятся в герцах.

Вместо скорости на границе твёрдого тела зададим перемещение. Так как скорость равна производной от перемещения, то амплитуда его определится через (42):

$$U = -iV_0 / w \quad (47)$$

Необходимо перевести узловые системы координат в цилиндрические: Main Menu> Preprocessor>Modeling>Move/Modify>Rotate Node CS>To Active CS> ALL.

К свободной границе твёрдого тела прикладываем перемещения: Main Menu >Solution>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>Nodes, предварительно выбрав узлы, лежащие на свободной границе ($r=0.95$). Вводим амплитуду перемещения ($-V/\omega$) в окно мнимой части. На линии $y=0$ определяем симметричные граничные условия: Main Menu >Solution>Loads>Define Loads>Apply>Structural> Displacement >Symmetry B.C.>On Lines.

Запускаем задачу на решение: Main Menu >Solution>Solve>Current LS.

3.4. Просмотр результатов

Решение содержит действительную и мнимую часть для каждой частоты. Физический смысл действительной и мнимой части заключается в том, что они в полной мере, характеризуют амплитуду и фазу колебаний. Соотношения, связывающие их, приведены ниже:

$$\operatorname{Re} P = P \cos j \quad (48)$$

$$\operatorname{Im} P = P \sin j \quad (49)$$

где P -амплитуда колебаний давления,
 j -фаза колебаний давления.

Применительно к данной задаче, следует отметить, что вместо скоростей на границе задаются перемещения. Если колебания скорости на границе происходят с нулевой фазой (по условиям задачи), то это означает, что мнимая часть скорости равна нулю. Перемещения, соответствующие этим скоростям, будут смещены по фазе, относительно скорости на 90 градусов. Т.е. для перемещений, действительная часть будет равна нулю. Аналогично для давлений действительная часть будет тоже равна нулю.

Смотрим мнимое решение на нашей частоте: Main Menu >General Postproc>Read Results>By Pick>Set 2. Строим эпюру распределения давлений: Main Menu >General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu>DOF Solution>Pressure.

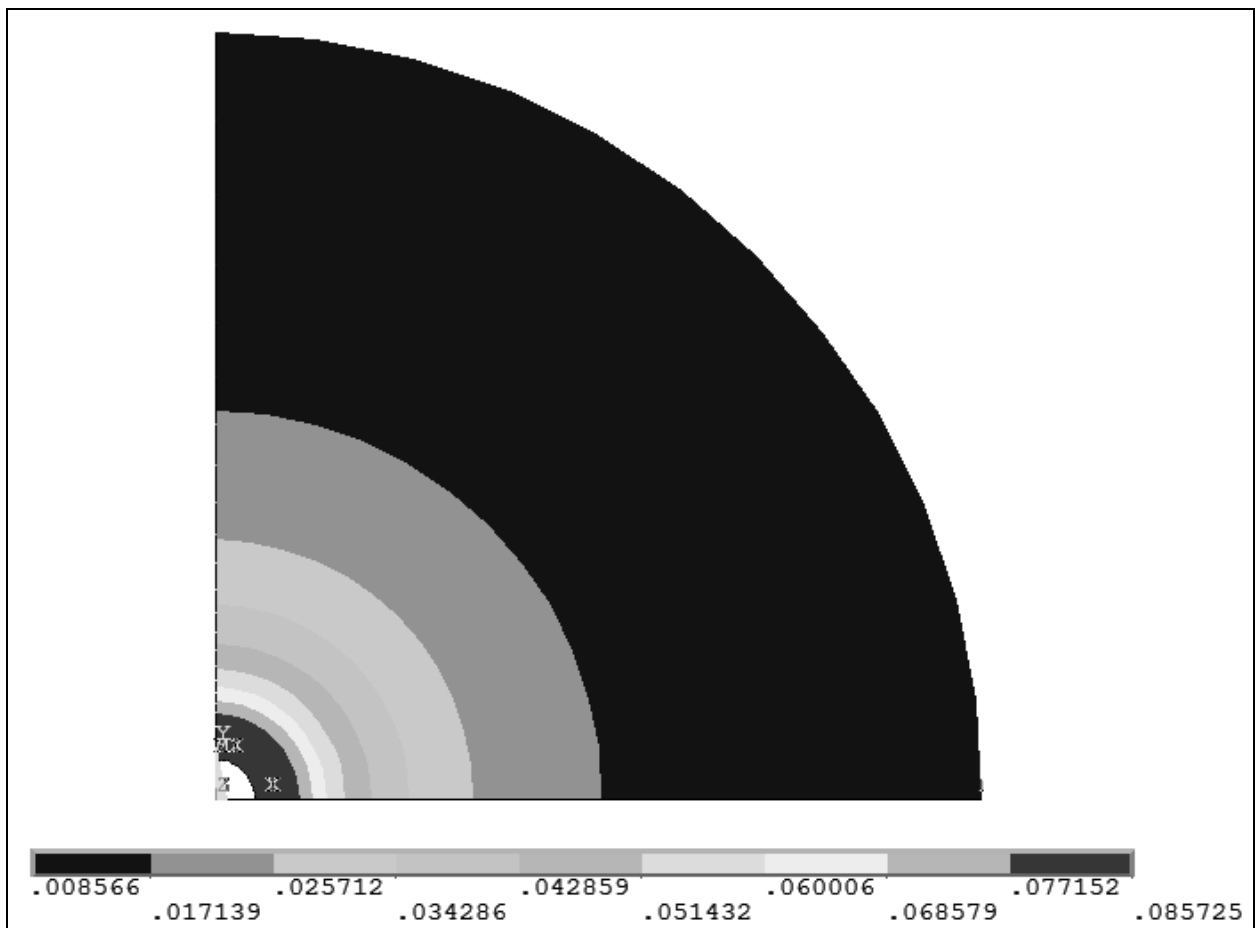


Рис. 8 Эпюра распределения давлений

По мимо этого, для исследования сходимости, нужно решить данную задачу на разных сетках. Ниже в таблице 1 приведены расчётные модели для разного количества элементов. В таблице 2 приведены результаты расчёта и сравнение с аналитическим решением. На рис.9 приведено графическое отображение результатов.

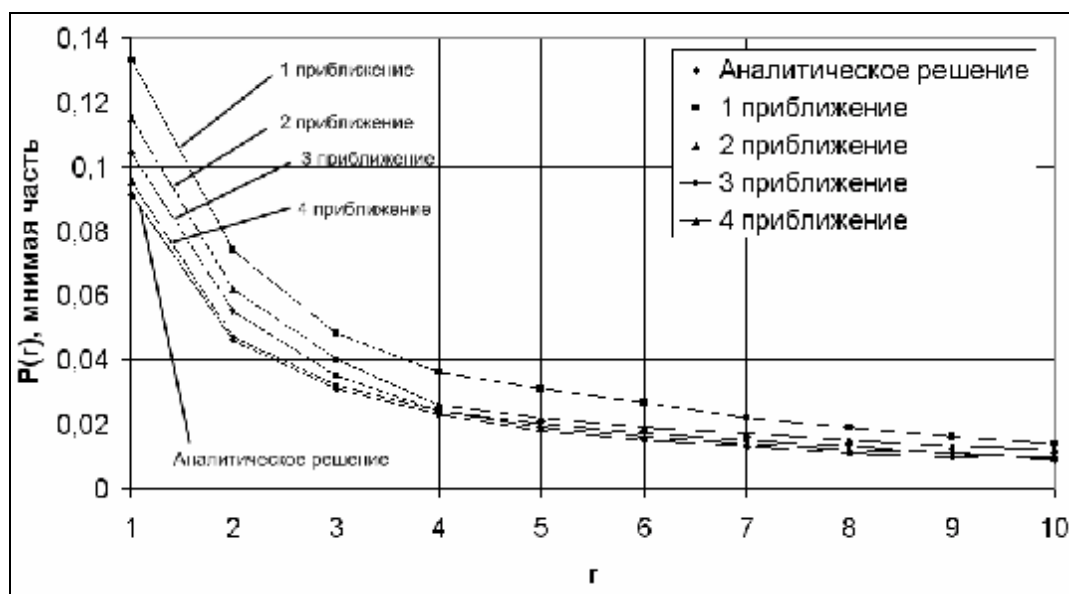


Рис.9 Распределение давления для разных вариантов КЭ модели.

Таблица 1

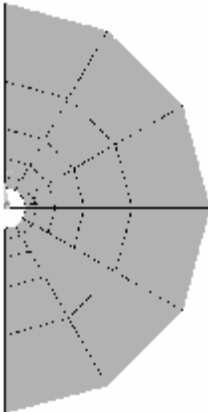
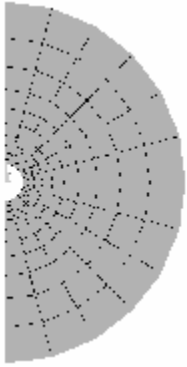
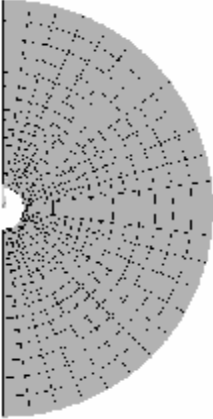

Сетки	Эскиз	Элементов на границе	Элементов всего	Узлов всего
1		6	30	42
2		12	144	193
3		24	528	575
4		80	4960	4991

Таблица 2

r	Аналитическое решение		МКЭ, приближения							
			1		2		3		4	
	Re(P)	Im(P)	Re(P)	Im(P)	Re(P)	Im(P)	Re(P)	Im(P)	Re(P)	Im(P)
1,01	0,0013	0,091	0,002	0,133	0,0017	0,115	0,0015	0,104	0,00138	0,0953
2	0,0013	0,046	0,002	0,074	0,0017	0,062	0,0015	0,055	0,00138	0,047
3	0,0013	0,031	0,002	0,048	0,0017	0,04	0,0015	0,035	0,00138	0,032
4	0,0013	0,023	0,002	0,036	0,0017	0,026	0,0015	0,024	0,00138	0,024
5	0,0013	0,018	0,002	0,031	0,0017	0,022	0,0015	0,02	0,00138	0,019
6	0,0013	0,015	0,002	0,0265	0,0017	0,019	0,0015	0,017	0,00138	0,016
7	0,0013	0,013	0,002	0,022	0,0017	0,017	0,0015	0,015	0,00138	0,014
8	0,0013	0,011	0,002	0,019	0,0017	0,015	0,0015	0,013	0,00138	0,012
9	0,0013	0,01	0,002	0,016	0,0017	0,013	0,0015	0,011	0,00138	0,011
10	0,0013	0,0091	0,002	0,014	0,0017	0,012	0,0015	0,01	0,00138	0,0095
Относительная ошибка, %				46,2		26,4		14,3		4,7

3.5. Командный файл задачи.

```

! Ввод констант
a=1.01
omega=0.1
rho=0.9
V=1
C=7
R=10
E1=10000
nu=0.3
/PREP7
!Создание элементов
ET,1,PLANE42
ET,2,FLUID29
ET,3,FLUID29
ET,4,FLUID129
! Опции элементов
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
KEYOPT,2,2,0
KEYOPT,2,3,1
KEYOPT,3,2,1
KEYOPT,3,3,1
KEYOPT,4,3,1
! Константы полубесконечных элементов
R,1,R,,

```

```

! Задание моделей материалов
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,E1

```

```

MPDATA,PRXY,1,,nu
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,rho
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,SONC,2,,c
! построение геометрии
! Опорные точки
K, ,,,
K, ,a,,
K, ,a-0.06,,
K, ,R,,
K, ,a,,
K, ,a-0.06,,
K, ,R,,
! Линии
LSTR, 3, 2
LSTR, 2, 4
LSTR, 6, 5
LSTR, 5, 7
! Дуги окружностей
LARC,5,2,1,a,
LARC,6,3,1,a-0.06,
LARC,7,4,1,R,
! Площади
FLST,2,4,4
FITEM,2,5
FITEM,2,3
FITEM,2,6
FITEM,2,1
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,2
FITEM,2,5
FITEM,2,4
FITEM,2,7
AL,P51X
! Задание атрибутов площадей и линий
CM,_Y,AREA
ASEL, , , 1
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT, 1, 1, 1, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CM,_Y,AREA
ASEL, , , 2
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
AATT, 2, 1, 3, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CM,_Y,LINE
LSEL, , , 7
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_Y1
LATT,2,1,4, , ,

```

```

CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
! Размеры элементов на линиях
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,4
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,,20,10,,,1
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,3
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,,1,1,,,1
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,5
FITEM,5,-6
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,,12,,,1
! Разбиение сетки
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
CM,_Y,AREA
ASEL,,,, 2
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
CM,_Y,AREA
ASEL,,,, 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
LMESH, 7
! Замена типа элементов около границы (включение опции разрешения взаимодействия с твёрдым телом)
FLST,5,12,2,ORDE,12
FITEM,5,1
FITEM,5,21
FITEM,5,41
FITEM,5,61
FITEM,5,81
FITEM,5,101
FITEM,5,121
FITEM,5,141
FITEM,5,161
FITEM,5,181
FITEM,5,201

```



```

FITEM,5,221
ESEL,S,,P51X
FLST,2,12,2,ORDE,12
FITEM,2,1
FITEM,2,21
FITEM,2,41
FITEM,2,61
FITEM,2,81
FITEM,2,101
FITEM,2,121
FITEM,2,141
FITEM,2,161
FITEM,2,181
FITEM,2,201
FITEM,2,221
EMODIF,P51X,TYPE,2,
ALLSEL,ALL
! Переход в цилиндрическую систему координат
CSYS,1
! Выбор узлов на границе и элементов с типом 2
NSEL,S,LOC,X,a
ESEL,S,TYPE,,2
! Согласование решений на границе
SF,all,FSI
ALLSEL,ALL
FINISH
/SOL
! Определение типа анализа
ANTYPE,3
! Задание диапазона расчётных частот
HARFRQ,omega/2/3.14,omega/2/3.14,
NSUBST,1,
KBC,0
FINISH
/PREP7
!Перевод узловых систем координат в цилиндрические
FLST,2,286,1,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-286
NROTAT,P51X
! Задание граничных условий
NSEL,S,LOC,X,0.95
FLST,2,13,1,ORDE,2
FITEM,2,274
FITEM,2,-286
/GO
D,P51X,,,-V/omega,,UX,,,,,
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
DL,P51X,,SYMM
ALLSEL,ALL
FINISH
! Запускаем задачу
/SOL
SOLVE
FINISH
!Выбираем нужную частоту и просматриваем на ней решение
/POST1
SET,LIST,999
SET,,, ,2

```

Список литературы

1. ANSYS 11.0, Documentation, Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench, Acoustics.
2. Стретт Дж. В. (лорд Рэлей), Теория звука. В 2-х томах, М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955.

Кудин Михаил Валерьевич

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АКУСТИКИ В
ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS**

Электронное методическое пособие

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.