

На правах рукописи

Шишаева Анастасия Сергеевна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПОДВИЖНЫХ И ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИИ С ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ ИЛИ ГАЗА**

Специальность: 05.13.18 – математическое моделирование, численные
методы, комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре вычислительной математики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Аксенов Андрей Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Зибаров Алексей Владимирович

доктор физико-математических наук
Сидлеров Дмитрий Анатольевич

Ведущая организация: Российский Федеральный Ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Защита состоится 29 декабря 2010 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.156.08 при Московском физико-техническом институте (государственном университете) по адресу: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-технического института (государственного университета).

Автореферат разослан «__» ноября 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Коновалов В.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задачи взаимодействия подвижных и деформируемых конструкций с жидкостью или газом широко распространены в науке, промышленности, медицине. Примерами таких задач в авиации являются флаттер крыльев и обшивки самолета, раскрытие парашюта, в автомобилестроении – аквапланирование автомобильной шины, в кораблестроении – движение судна, в машиностроении – движение масла через уплотнители, деформация лопаток турбины в потоке, тепловые деформации работающего подшипника, в медицине – работа сердца движение крови по деформируемым сосудам. Основная сложность моделирования взаимодействия жидкости и конструкций заключается в необходимости получения совместного согласованного решения уравнений динамики конструкции и уравнений движения жидкости или газа.

За последние десятилетия разработано большое количество аналитических и полуэмпирических методов. Однако, данные методы преимущественно применимы для узкого класса задач с простейшей геометрией и рядом ограничений, накладываемых на постановку задачи и граничные условия. В то же время, для решения промышленных задач требуется учитывать сколь угодно сложную геометрию и граничные условия. Поэтому, одним из основных и наиболее перспективных методов для решения задач является прямое численное моделирование.

Существуют два основных метода для решения задач взаимодействия жидкости и конструкции с помощью численного моделирования: монолитный и метод расщепления. Монолитный метод подразумевает сведение задачи в одну систему уравнений с единым методом их решения. Метод расщепления предполагает разделение всей системы уравнений на подсистемы, которые решаются отдельно, периодически обмениваясь данными через заданный интервал времени. Монолитный метод более

устойчив и лучше отражает физику явления. Однако он требует общего математического аппарата для решения всех уравнений, в то время как большинство существующих на сегодняшний день решателей ориентированы либо на моделирование динамики деформируемых конструкций, либо на моделирование движения жидкости или газа. Метод расщепления позволяет использовать существующие решатели. Самая простая модификация метода расщепления – явный метод расщепления. При использовании явного метода расщепления решение подсистем осуществляется один раз на одном интервале обмена. Однако известно, что явная схема он обладает численной неустойчивостью. Причина неустойчивости – неравенство значений скорости поверхности конструкции и нагрузок на ней, вычисленных в подсистемах в моменты обмена. Существует три пути устранения неустойчивости: использование неявной схемы расщепления, использование явной схемы с предиктор/корректором и использование искусственной сжимаемости. Использование неявной схемы в методе расщепления предполагает повторное решение уравнений движения жидкости и динамики конструкции вплоть до достижения согласованного решения обеих подсистем. Такой способ позволяет в значительной мере устранить причину неустойчивости, однако в десятки раз увеличивает время расчета. Использование предиктор/корректора предполагает предсказание скорости границы со стороны конструкции и нагрузки на границе со стороны потока на следующем шаге. Однако, поскольку нагрузки, вычисляемые в потоке, зависят от предсказанных, а не истинных смещений твердого тела на границе раздела, в случае недостаточно точного предсказания это также может приводить к неустойчивости. Использование искусственной сжимаемости предполагает внедрение в уравнение неразрывности для жидкости коэффициентов демпфирования, предугадывающих отклик подвижной или деформируемой конструкции на изменение нагрузки со стороны потока.

Таким образом, разработка эффективных алгоритмов для моделирования взаимодействия жидкости и конструкции, обладающих достаточным запасом устойчивости, является актуальной задачей.

Цель работы. Разработка технологии решения задач взаимодействия подвижных и деформируемых элементов конструкции с потоком жидкости или газа. Применение ее для решения практически важных задач.

Научная новизна. Впервые для расширения диапазона устойчивости явного метода расщепления введены демпфирующие коэффициенты *Податливость* и *Мобильность*, которые обеспечивают устойчивую работу алгоритма в широком диапазоне параметров. Проведено теоретическое и численное исследование, подтверждающее расширение границ устойчивости алгоритма. С помощью разработанного алгоритма исследовано поведение защемленной с двух сторон пластины в до- и сверхзвуковом потоке газа. Подтвержден недавно открытый одномодовый флаттер пластины на низких сверхзвуковых скоростях. Обнаружено, что неустойчивость пластины при переходе на дозвуковые скорости принимает форму выпучивания с амплитудой, соответствующей амплитуде флаттера. Исследована зависимость флаттера и выпучивания от безразмерных параметров.

Практическая ценность. Разработан метод, предназначенный для численного решения задач взаимодействия подвижных и деформируемых элементов конструкции с потоком жидкости или газа, сочетающий высокую скорость, точность и устойчивость вычислений. Данный метод использован для разработки прямого сопряжения программных комплексов FlowVision-НПС и Abaqus, предназначенных для решения широкого круга задач. Посредством разработанного метода исследована неустойчивость деформируемой пластины в потоке газа, проведено численное моделирование работы уплотнителя, подшипника скольжения, а также

устройства автоматического бесконтактного захвата. Разработанный метод может с успехом применяться в процессе промышленной разработки в авиации, автомобилестроении, судостроении, машиностроении, атомной промышленности, автоматизации производства и медицине.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработан метод связывания программных комплексов, предназначенных для расчета уравнений движения жидкости и деформации конструкций на основе введения пристенных демпфирующих коэффициентов.
2. Исследовано влияние пристенных демпфирующих коэффициентов («податливость» и «мобильность») на численную устойчивость совместного решения.
3. Решена задача о поведении упругой пластины в до- и сверхзвуковом потоке газа с помощью разработанного метода. Получена зависимость амплитуды выпучивания пластины и амплитуды и частоты флаттера пластины от параметров материала и размеров пластины и потока газа.
4. Решен ряд практически важных задач с помощью разработанного метода: левитация ротора опорного подшипника, определение расхода масла через маслосъемный колпачок, определена зависимость времени центровки детали от скорости центрирующей струи газа в автоматической сборочной линии.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 49-й научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” (Долгопрудный, Россия, 2006), Конференции пользователей ABAQUS (Abaqus Users' Conference) (Париж, Франция, 2008), 51-й научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” (Долгопрудный, Россия, 2008), VI Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых

(Санкт-Петербург, Россия, 2009), 52-й научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” (Долгопрудный, Россия, 2009), VIII Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (Алушта, 2010), конференции пользователей ABAQUS (Abaqus Users' Conference) (Чикаго, США, 2010).

Публикации результатов. По теме диссертации опубликовано 4 статьи, 6 тезисов, сделано 8 научных докладов.

Личный вклад автора. Общая постановка задачи и определение направлений исследований принадлежит научному руководителю. Все результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно.

Структура диссертации. Диссертация изложена на 139 страницах машинописного текста, содержит 6 таблиц, проиллюстрирована 83 рисунками, состоит из 4 глав, выводов, списка литературы, включающего 95 наименований и приложения.

В *первой главе* приведен анализ литературных данных и состояния вопроса по алгоритмам решения задач взаимодействия подвижной и деформируемой конструкции с потоком жидкости или газа, проанализированы достоинства и недостатки различных алгоритмов, сформулированы задачи исследования. *Вторая глава* посвящена описанию разработанного алгоритма и демпфирующих коэффициентов, теоретическому и численному исследованию устойчивости. *Третья глава* посвящена описанию исследования неустойчивости упругой пластины в до- и сверхзвуковом потоке газа. В *четвертой главе* описан ряд практически важных задач, решенных с помощью разработанного метода, а именно, возникновение левитации при работе опорного подшипника скольжения, работа уплотнителя в маслоъемном колпачке, и работа устройства автоматического захвата.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, описывается круг задач, дается краткий обзор существующих численных методов, а также формулируются цели диссертационной работы.

Первая глава посвящена детальному анализу разработанных на сегодняшний день численных методов для решения задач взаимодействия подвижной и деформируемой конструкции с потоком жидкости или газа.

Во второй главе представлен метод решения задач взаимодействия подвижных и деформируемых элементов конструкции с потоком жидкости или газа с помощью программных комплексов Abaqus и FlowVision-НПС.

В первой части второй главы приведено описание расчетной схемы. Моделирование движения и теплообмена в жидкости и газе, а также движения твердого тела осуществляется в программном комплексе FlowVision-НПС, основанном на методе контрольных объемов. Моделирование движения, деформации и нагрева конструкций осуществляется в программном комплексе Abaqus, основанном на методе конечных элементов. Связь между уравнениями движения и деформации конструкции и уравнениями движения жидкости и газа осуществляется посредством прямого явного сопряжения. Рассмотрим разработанный метод на примере моделирования взаимодействия деформируемой конструкции с идеальной несжимаемой жидкостью. Уравнение для деформации конструкции решается в Abaqus и в дискретной форме имеет вид:

$$m \frac{\mathbf{W}^{i+1} - \mathbf{W}^i}{\tau^{i+1}} = \mathbf{F}^{i+1}_{ext} + \mathbf{F}^i_f - \mathbf{I}^{i+1}, \quad (1)$$

где i – номер шага по времени, m – масса элемента конструкции, \mathbf{W} – скорость поверхности конструкции, \mathbf{F}_{ext} – внешняя сила, действующая на элемент, не со стороны жидкости или газа, \mathbf{F}_f – внешняя сила, действующая

на элемент, со стороны жидкости или газа, \mathbf{I} – внутренняя сила, действующая на элемент конструкции, $\tau^{i+1} = T^{i+1} - T^i$ - шаг по времени, T – время. При моделировании движения твердого тела уравнение (1) модифицируется к виду:

$$m \frac{\mathbf{W}^{i+1} - \mathbf{W}^i}{\tau^{i+1}} = \mathbf{F}^i + \mathbf{F}_f^i,$$

и решается во FlowVision-НПС.

Уравнения для моделирования движения жидкости решаются во FlowVision-НПС и в дискретной форме имеют вид:

$$\frac{\mathbf{V}^{i+1} - \mathbf{V}^i}{\tau^{i+1}} \Omega + \oint_S \mathbf{V}^{i+1} ((\mathbf{V}^{i+1} - \mathbf{W}^{i+1}) ds) = - \oint_S \frac{P^{i+1}}{\rho} ds, \quad (2)$$

$$\oint_S ((\mathbf{V}^{i+1} - \mathbf{W}^{i+1}) ds) = 0, \quad (3)$$

где Ω – объем элемента жидкости, \mathbf{V} – скорость жидкости, \mathbf{s} – векторная площадь поверхности элемента, P – давление в жидкости, ρ – плотность жидкости. Решение уравнений осуществляется поочередно на каждом временном шаге.

Сила, действующая на конструкцию со стороны жидкости или газа, равна $\mathbf{F}_f = P \cdot \mathbf{s}$,

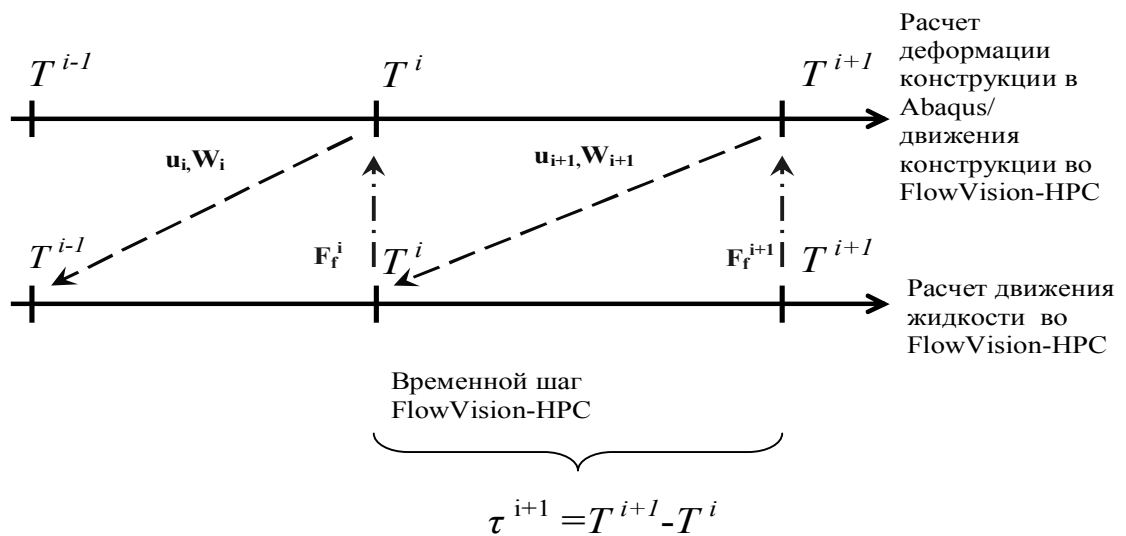


Рис. 1. Алгоритм сопряжения расчета взаимодействия подвижной или деформируемой конструкции в Abaqus и FlowVision-НПС

Во второй части второй главы приведено описание демпфирующих коэффициентов, предназначенных для улучшения устойчивости схемы. Рассматривается уравнение (3). Проблемы, возникающие при использовании явного метода, появляются из-за того, что в данном уравнении скорость жидкости V^{i+1} вычислена при давлении и вязком напряжении с шага $i+1$, а скорость поверхности тела W^{i+1} – при значении силы с шага i . Подстановка последнего в разностную схему вызывает осцилляции давления и может привести к расхождению решения. Для предотвращения осцилляций необходимо предугадать изменение скорости ΔW на шаге $i+1$ под действием силы со стороны жидкости.

В данной работе предлагается оценивать изменение скорости по формуле:

$$\Delta W = C \cdot \frac{\Delta P}{\tau} \cdot \mathbf{n} + B \cdot \Delta P \cdot \tau \cdot \mathbf{n}, \quad (4)$$

где ΔP – изменение давления, \mathbf{n} – нормальный к поверхности вектор, C и B – демпфирующие коэффициенты Податливость и Мобильность. Податливость конструкции C вычисляется по формуле:

$$C = \frac{\Delta l}{\Delta P}, \quad (5)$$

где Δl – перемещение элемента при изменении давления на ΔP . Физический смысл параметра Податливость – линейный отклик элемента подвижной конструкции на изменение давления. Мобильность конструкции вычисляется по формуле:

$$B = \frac{s}{m}, \quad (6)$$

где s – площадь элемента конструкции. Мобильность можно охарактеризовать как величину, обратную инертности элемента конструкции с единичной площадью. Значения Податливости и Мобильности неизвестны при моделировании движения жидкости. Однако стартовые значения C_0 и B_0 можно оценить, подставив в формулы (5) и (6) средние значения параметров

конструкции. Так, C_0 можно положить равным отношению предполагаемого перемещения всей конструкции к среднему значению изменения давления, а B_0 – отношению площади конструкции к ее массе.

Подстановка выражения для изменения скорости (4) в уравнение неразрывности с учетом постоянства C и B дает:

$$\oint_S (\mathbf{v}^{i+1} - \mathbf{w}^{i+1}) d\mathbf{s} = (C + B(\tau^{i+1})^2) \frac{\Delta P^{i+1}}{\tau^{i+1}} S. \quad (7)$$

Выражение в правой части уравнения (7) может трактоваться как искусственная сжимаемость жидкости в пристенных ячейках.

В третьей части второй главы приведено теоретическое подтверждение возможности улучшения устойчивости посредством использования демпфирующих коэффициентов на примере упрощенной одномерной схемы.

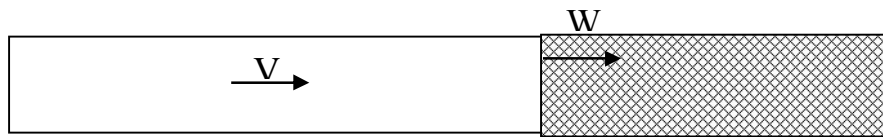


Рис. 2. Движение поршня под воздействием давления со стороны жидкости.

Исследование устойчивости упрощенной расчетной схемы проводится на примере моделирования одномерного движения жесткого незакрепленного поршня под воздействием давления со стороны жидкости (см. Рис. 2). Движения поршня в безразмерном виде описывается следующей системой уравнений:

$$\dot{W} = a \cdot P \quad (8)$$

$$\dot{P} = - \left[2 \frac{dV}{dt} + \frac{d^2V}{dt^2} + a \cdot P \right] \quad (9)$$

$$V = W, \quad (10)$$

где a – отношение массы жидкости к массе поршня. В дискретном виде уравнения (8)-(10) без учета демпфирующих коэффициентов имеют вид:

$$W^{(i+1)} = W^{(i)} + \tau \cdot a \cdot P^{(i)} \quad (11)$$

$$P^{(i+1)} = P^{(i)} - \tau \left[2 \frac{dV}{dt} + \frac{d^2V}{dt^2} + a \cdot P \right]^{(i)} \quad (12)$$

$$V^{i+1} = W^{i+1}. \quad (13)$$

При использовании демпфирующих коэффициентов уравнение (13) приобретает вид:

$$V^i = W^i + A \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right)^{(i)}.$$

где $A = C + B\tau^2$. Далее приводится исследование обеих схем на устойчивость посредством метода усиления мод. Обнаружено, что без демпфирующих коэффициентов схема становится неустойчивой при $a > \frac{4}{4+3\tau}$, а с их применением – при $a > \frac{4}{4-2A+3\tau}$. Последнее означает, что использование демпфирующих коэффициентов позволяет улучшить устойчивость задачи.

В четвертой части второй главы приводится численное исследование влияния демпфирующих коэффициентов на устойчивость конкретной расчетной схемы на примере моделирования одномерного движения незакрепленного поршня и поршня, закрепленного на пружине, под

воздействием давления со стороны жидкости. Для расчетов использовался программный комплекс FlowVision-НПС. Установлено, что при снижении отношения плотности поршня к плотности жидкости, амплитуда колебаний, возникающих вследствие развития неустойчивости, усиливается и при отношении плотностей 0.5 становится сопоставимой с величиной силы, действующей на поршень. Далее проводятся расчеты с использованием Податливости и Мобильности. Мобильность используется при моделировании движения свободного поршня, а Податливость используется при моделировании движения поршня, закрепленного на пружине.

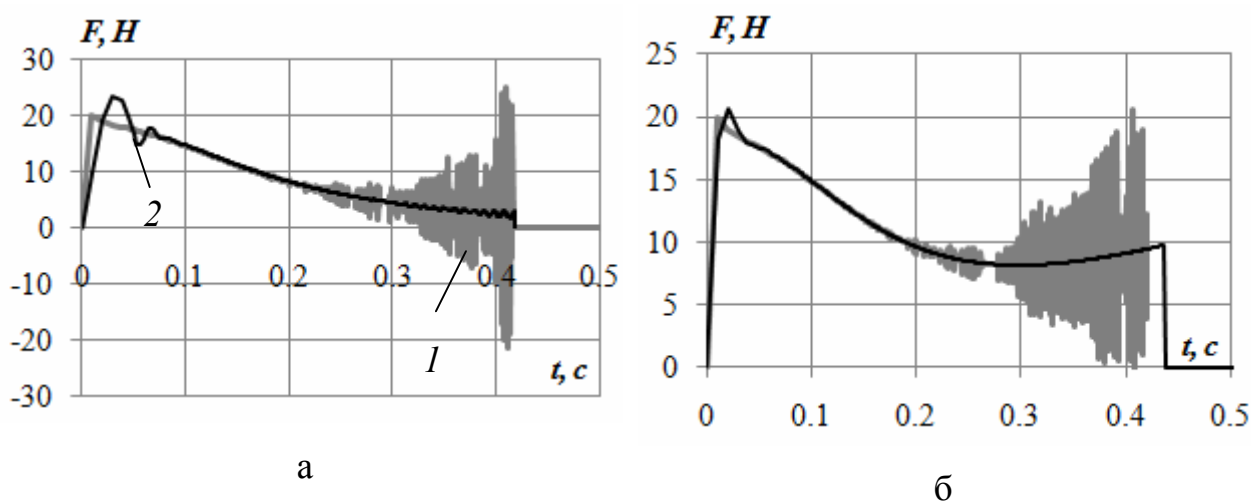


Рис. 3. Сила, действующая на незакрепленный поршень (а): 1 – $B = 0$, 2 – $B = 10B_0$, и на поршень, закрепленный на пружине (б): 1 – $C = 0$, 2 – $C = 0.001C_0$,

Установлено, что использование демпфирующих коэффициентов позволяет улучшить устойчивость решения. Определяются оптимальные значения Податливости $C = 0.001C_0$ и Мобильности $B = 10B_0$ (см. Рис. 3).

В третьей главе представлено применение разработанного метода для исследования устойчивости деформируемой защемленной с двух сторон пластины в до- и сверхзвуковом потоке газа. Деформация пластины моделируется в Abaqus, движение газа моделируется во FlowVision-НПС.

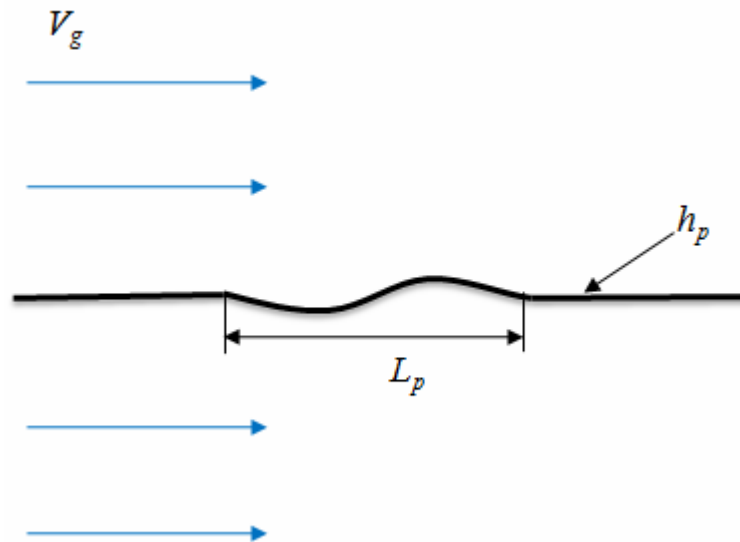


Рис. 4. Обтекания пластины потоком газа.

В задаче имеется четыре безразмерных параметра, определяющих картину течения: $M = \frac{V_g}{a}$ – число Маха, $D = \frac{E_p}{12(1-\nu^2)a^2\rho_p}$ – жесткость пластины, $\rho = \frac{\rho_p}{\rho_a}$ – плотность пластины, $L = \frac{L_p}{h_p}$ – длина пластины. Здесь V_g – скорость газа вдали от пластины, a – скорость звука в газе, E_p – модуль Юнга пластины, ν – коэффициент Пуассона пластины, ρ_p – плотность пластины, ρ_a – плотность газа вдали от пластины, L_p – длина пластины, h_p – толщина пластины.

Обнаружено три основных типа поведения пластины: устойчивое равновесие, статическая неустойчивость в виде выпучивания, и динамическая неустойчивость в виде флаттера. Причем, статическая неустойчивость наблюдается только при дозвуковом течении, а динамическая неустойчивость – только при сверхзвуковом течении. Обнаружен флаттер двух видов: в виде бегущей волны и стоячей волны. Причем бегущая волна наблюдается при числе Маха $M < 1.2$, а стоячая при числе Маха $M > 1.2$. Существование выпучивания при дозвуковом обтекании, флаттера при низком сверхзвуковом обтекании, а также бегущая волна при флаттере с $M < 1.2$ хорошо согласуются с теоретическими и

экспериментальными исследованиями, проведенными ранее. Зависимость амплитуды выпучивания и флаттера от безразмерных параметров, является новым фактом.

	Асимптотическая теория	Моделирование
$M (D = 21.5, \rho = 6000, L=300)$	1.07	1
$D (M = 1.15, \rho = 6000, L=300)$	86	53.4
$\rho (M = 1.15, D = 21.5, L=300)$	Не зависит	Не зависит
$L (M = 1.15, D = 21.5, \rho = 6000)$	150	146

Проведено исследование возникновения неустойчивости пластины в зависимости от определяющих параметров: числа Маха, безразмерной длины, безразмерной жесткости и безразмерной плотности. Для сверхзвукового обтекания проведено сравнение с асимптотической теорией. Полученные результаты исследований хорошо согласуются с асимптотической теорией при изменении числа Маха, безразмерной длины, безразмерной плотности и несколько хуже при изменении безразмерной жесткости. Это может быть обусловлено тем, что асимптотическая теория дает очень большие изменения безразмерной жесткости при незначительных изменениях числа Маха в точке возникновения неустойчивости.

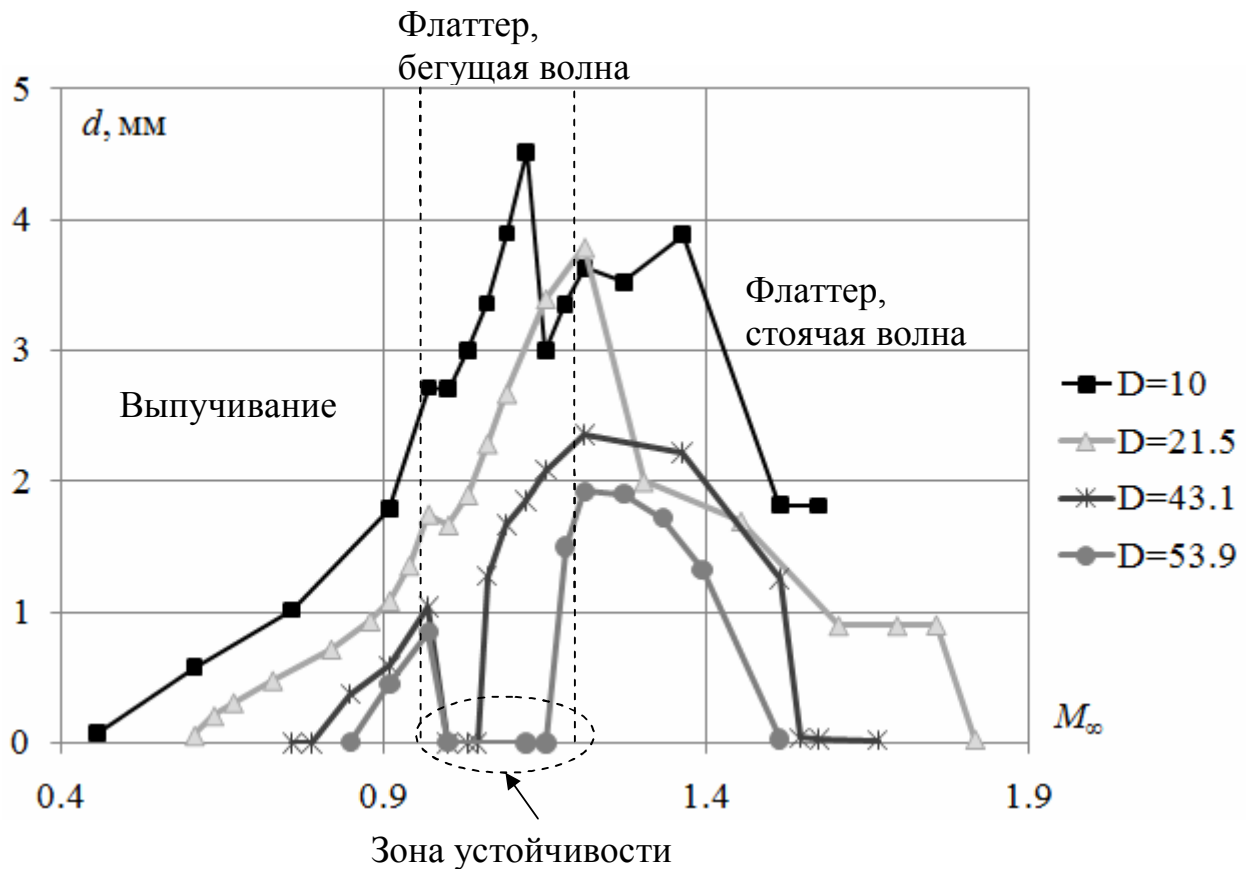


Рис. 5. Зависимость величины отклонения/амплитуды колебания пластины от числа Маха M и безразмерной жесткости D , при $\rho = 6000, L=300$.

Проведено исследование поведения пластины в зависимости от числа Маха и при различных безразмерных жесткостях. Получено, что при малых значениях безразмерной жесткости при $M=1$ статическая неустойчивость переходит в динамическую неустойчивость с аналогичной амплитудой, а при повышении жесткости при $M=1$ появляется зона устойчивости (см. Рис. 5).

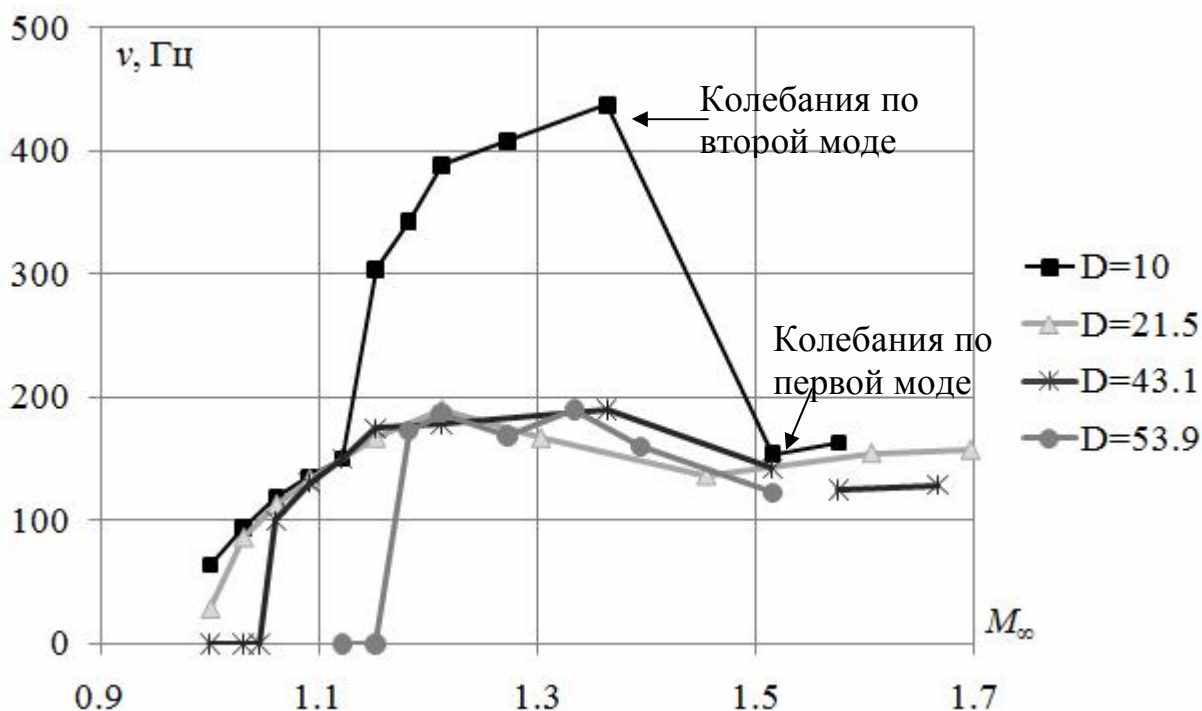


Рис. 6. Зависимость частоты колебания пластины от числа Маха M и безразмерной жесткости D , при $\rho = 6000$, $L=300$.

Также, получено, что при уменьшении безразмерной жесткости D амплитуда пластины возрастает, а частота остается постоянной до тех пор, пока при достаточно малых D не будет активизирована вторая мода колебания пластины (см. Рис. 6). Это можно объяснить тем, что безразмерная жесткость влияет только на возникновение колебания пластины с определенной частотой и величину отклонения, но не на значение частоты колебания. Также следует отметить, что частота колебания пластины монотонно возрастает при числе Маха $1 < M < 1.2$ в зоне бегущей волны, а затем немонотонно меняется в небольшом интервале значений. При колебании пластины по первой моде амплитуда колебаний также монотонно возрастает при числе Маха $1 < M < 1.2$, а затем монотонно убывает независимо от безразмерной жесткости.

В четвертой главе представлено применение разработанного метода для решения практически важных задач с использованием разработанного метода.



Рис. 7. Зависимость подъемной силы (F_1), действующей на вал, от величины зазора (d)

В первой части четвертой главы представлено моделирование работы опорного подшипника скольжения посредством сопряжения программных комплексов Abaqus и FlowVision-НРС. В исследуемом подшипни-

ке клиновидный зазор между опорой и валом возникает за счет неравномерного теплового расширения опоры при нагреве из-за трения в масле, заполняющим зазор. Течение масла в клиновидном зазоре порождает подъемную силу, которая уравнивает вес вала.

В ходе решения задачи проводится серия расчетов при различной толщине зазора, определяется зависимость подъемной силы от величины зазора, определяется само значение зазора, соответствующее силе, равной весу вала (см. Рис. 7). Для найденной толщины определяется форма деформированной опоры подшипника и распределение температуры в зазоре подшипника. Значение величины зазора, образующегося в подшипнике, хорошо согласуется с экспериментом.

Во второй части четвертой главы представлено моделирование работы маслоъемного колпачка посредством сопряжения программных комплексов Abaqus и FlowVision-НРС.

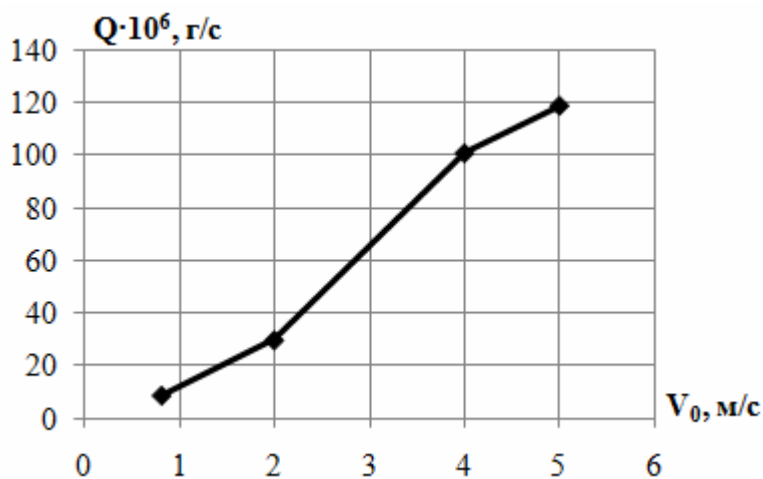


Рис. 8. Зависимость расхода масла Q через уплотнитель от амплитуды колебания штока V_0 при постоянной частоте колебания $\omega = 32$ рад/с

В результате моделирования работы маслоъемного колпачка получено, что расход масла через него линейно зависит от амплитуды колебания штока (см. Рис. 8) и практически не зависит от частоты колебания. Расход, полученный при рабочем режиме, хорошо

согласуется с расходом реальным маслом в современном автомобиле.

В третьей части четвертой главы представлено моделирование работы пневматического захватного устройства, предназначенного для захвата колец уплотнения с конвейерной ленты. Захват производится посредством вакуумного канала. Вакуумный канал – канал, имеющий форму кольца, давление в котором составляет порядка 0.1 атм. Выходное отверстие

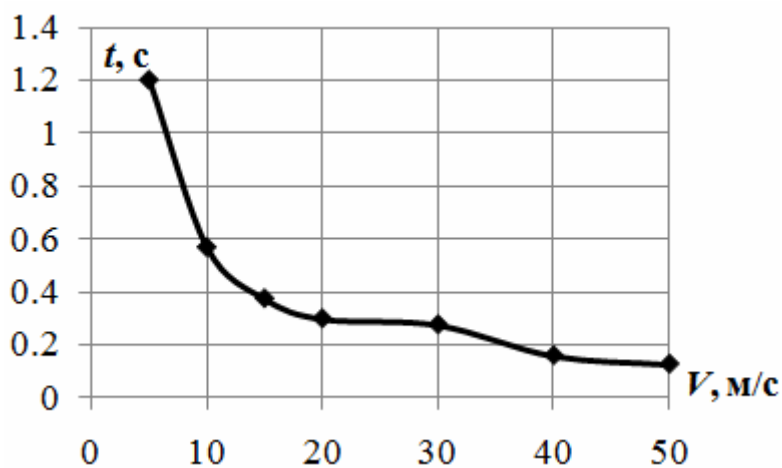


Рис. 9 Время центрирования t кольца при различных скоростях потока V центрирующей струе

вакуумного канала находится непосредственно над конвейерной лентой. Захват кольца осуществляется за счет всасывающей силы, обусловленной низким давлением в канале. Прежде чем произвести захват, необходимо провести центровку кольца: поместить кольцо напротив вакуумного ка-

нала так, чтобы центр вакуумного кольца совпадал с центром канала. Центровка осуществляется с помощью струи воздуха, истекающей из отверстия в центре канала.

В результате моделирования работы пневматического захватного устройства получена зависимость времени центровки колец от скорости центрирующей струи (см. Рис. 9). Время центровки кольца при рабочей скорости струи хорошо согласуется с экспериментом.

Основные результаты и выводы

1. Разработан метод решения задач взаимодействия подвижной и деформируемой конструкции с потоком жидкости или газа в программных комплексах Abaqus и FlowVision-HPC.
2. Для расширения устойчивости метода введены коэффициенты демпфирования Податливость и Мобильность. Возможность применения демпфирующих коэффициентов для расширения области устойчивости обоснована теоретически на упрощенной схеме. Проведены прямые численные эксперименты по подбору значений параметров.
3. С использованием разработанного метода проведено исследование устойчивости защемленной с двух сторон пластины в до- и сверхзвуковом потоке газа. Численно подтверждено существование выпучивания при дозвуковом обтекании пластины и флаттера при низком сверхзвуковом обтекании, ранее описанных теоретически и обнаруженных экспериментально. Исследована зависимость амплитуды выпучивания и флаттера, а также частоты флаттера от безразмерных параметров, определяющих задачу.
4. С использованием разработанного метода проведено численное моделирование работы опорного подшипника скольжения, маслоъемного колпачка и пневматического захватного устройства. Получено хорошее совпадение с результатами экспериментов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Шишаева А.С., Жлуктов С.В., Кузнецов К.В., Аксенов А.А. Численное моделирование работы опорного подшипника с помощью прямого сопряжения систем Abaqus и FlowVision-HPC // Известия Волгоградского Государственного Технического Университета, Серия Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и

- информатики в технических системах, Выпуск 7, №12 (60). 2009, Волгоград. С. 51-54.
2. Кристаль М.Г., Срегачев Е.В., Волчков В.М., Татаринцев Д.Ю., Шишаева А.С. Компьютерное моделирование процесса захвата уплотнительных колец пневматическим захватным устройством // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010, 10, С.3-6.
 3. Жлуктов С.В., Аксенов А.А., Харченко С.А., Москалев И.В., Сушко Г.Б., Шишаева А.С. Моделирование отрывных течений в программном комплексе FLOWVISION-НПС // Вычислительные методы и программирование. 2010. Том 11, С. 234-245.
 4. Аксенов А.А. Шишаева А.С. Моделирование взаимодействия деформируемой конструкции с потоком жидкости с использованием пристенных демпфирующих коэффициентов // Вычислительные методы и программирование. 2010. Том 11, С. 366-372.
 5. Аксенов А.А., Веденеев В.В., Кузнецов К.В., Шишаева А.С. Моделирование сверхзвукового флаттера пластины посредством прямого сопряжения программных комплексов Abaqus и FlowVision НПС // Материалы 8-й Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2010). М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. С. 288-290.
 6. Chen R., Aksenov A., Shishaeva A., Kuo F. Onset of Levitation in Thrust Bearing: FSI Study Using Abaqus-FlowVision Coupling // SIMULIA Customer Conference, Providence, Rhode Island, May 2010, pp. 538-545.
 7. Aksenov A., Korenev D., Shyshaeva A., Vucinic D., Mravak Z. Drop-Test FSI Simulation with Abaqus and FlowVision Based on the Direct 2-Way Coupling Approach // Abaqus Users' Conference, Newport, Rhode Island, May 2008, pp. 611-624.
 8. Шишаева А.С. Моделирование работы маслоъемного колпачка посредством программных комплексов ABAQUS и FLOWVISION //

Сборник трудов 49-й научной конференции МФТИ. Часть III. М., 2006. С.155

9. Шишаева А.С., Жлуктов С.В., Кузнецов К.К., Аксенов А.А. Применение прямого сопряжения систем ABAQUS и FLOWVISION-НРС для моделирования работы подшипника скольжения // Сборник трудов 52-й научной конференции МФТИ. Часть III. М., 2009. С. 135-138.
10. Шишаева А.С., Кузнецов К.К., Аксенов А.А. Применение прямого сопряжения систем ABAQUS и FlowVision-НРС для моделирования течения жидкости через уплотнитель // Сборник трудов 52-й научной конференции МФТИ. Часть III. М., 2009. С.70-71.