

УДК 531/534:061.6

МОСКОВСКИЙ АВТОМЕХАНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

СЕМИНАРЫ

Семинар по механике деформируемого твердого тела
под руководством Э. И. Григолока

6 X 1977. Ш. У. Галиев (Киев) *Нелинейная динамика взаимодействия деформируемых тел со сжимаемой жидкостью.*

Дана нелинейная постановка проблемы взаимодействия сжимаемой жидкости и твердого деформируемого тела, свободная от предположений о физической линейности материала тела, о его тонкостенности, об отсутствии кавитации в жидкости, о линейности гидродинамических сил и краевых условий на поверхности раздела сред. Предложена модель сплошной среды с ограничением на давление, приближенно описывающая поведение кавитирующей жидкости. Развита метод решения задач взаимодействия при произвольных смещениях границы раздела сред, основанный на изучении движения жидкости в деформируемой системе координат, одна из координатных поверхностей которой жестко связана с границей раздела. Получена формула, определяющая давление, возникающее в первые моменты взаимодействия плоской волны конечной амплитуды с деформируемым телом. Записаны уравнения движения пологой упругопластической (теория течения) оболочки с учетом нелинейности гидродинамических сил и кавитации на обтекаемой поверхности.

Решение задач нелинейного взаимодействия как в жидкой, так и в твердой областях предлагается строить пошаговым методом — численно. При решении частных задач используется метод конечных разностей. Изучается влияние на процесс взаимодействия кавитации в жидкости, сильного изменения геометрии жидкой и твердой сред, пластических свойств материала препятствия. Исследуется динамика появления, движения и исчезновения кавитационных зон, возникающих при падении подводной волны на тонкостенные препятствия. Рассмотрено взаимодействие волны в жидкости с конечными и бесконечными, гладкими и оребренными толсто-стенными цилиндрами.

13 X 1977. О. И. Чередниченко (Москва) *Нелинейное деформирование сферических оболочек при некоторых видах контактного нагружения.*

Излагаются результаты численного исследования жесткостных характеристик и напряженно-деформированного состояния пологих и непологих сферических оболочек при сосредоточенном нагружении в полюсе, а также нагружении через жесткую плиту. Процесс деформирования оболочек представляется в виде последовательности равновесных состояний. Условие равновесия системы определяется из принципа минимума Лагранжа. Минимизация функционала осуществляется на ЭЦВМ методом локальных вариаций.

Изменение величины усилия, прикладываемого к жесткой плите, сопровождается изменением размеров и формы места контакта и протекает в три этапа — точка, пятно, окружность. Переход от плоской формы равновесия участка оболочки к деформируемому состоянию с осесимметричной вмятиной осуществляется хлопком. Определяются величины нагрузок, при которых происходит прямое и обратное прохлопывание оболочек. Сравнение жесткостных характеристик при сосредоточенном нагружении и нагружении через жесткую плиту позволило выделить общий начальный этап деформирования системы в обоих случаях контактного нагружения.

Исследуется изменение жесткостных характеристик в рассматриваемых случаях нагружения при нелинейно-упругом поведении материала оболочек. Диаграммы материала с линейным или нелинейным упрочнением подбираются с помощью трех констант из условия наилучшего приближения к реальным. Сравнение с результатами известных экспериментов подтверждает необходимость учета физической нелинейности.

Изучается влияние подкрепления в виде центрально-установленного жесткого кругового фланца на прочность, жесткость и устойчивость системы.

20 X 1977. В. Н. Кассихин (Курск) *Свободные колебания круговых трехслойных пластин.*

Рассмотрены свободные поперечные колебания круглых и кольцевых пластин в рамках теории трехслойных оболочек Э. И. Григолюка — П. П. Чулкова с учетом всех инерционных членов. Показана возможность получения точного решения в виде комбинации цилиндрических функций в пределах принятых гипотез при пренебрежении частью инерционных составляющих. На контурах пластины приняты обобщенные граничные условия. Проведена оценка влияния упругих опор на частоту свободных колебаний. Изложен алгоритм по определению собственных чисел задачи. Для определения частотных параметров получены трансцендентные уравнения в случае осесимметричных и неосесимметричных форм колебаний. Предложена возможность расширения диапазона применения модифицированных функций Бесселя первого и второго рода n -го порядка.

Оценено влияние физико-механических свойств и геометрии пластин на собственную частоту. Приведено сравнение с известными результатами. Дан полный анализ осесимметричных свободных колебаний круговых пластин по первым пяти формам.

3 XI 1977. Е. З. Король (Москва) *О механизме отслаивания структурно-нестабильных высокотемпературных материалов при нагреве.*

На основе предложенного ранее (Изв. АН СССР. МТТ, 1976, № 5) варианта теории упругопластического деформирования структурно-нестабильных высокотемпературных материалов (структурная неустойчивость обусловлена дегидрацией, спеканием или фазовыми превращениями при нагреве в порошкообразных смесях из кристаллических и стеклообразных, каковыми являются большинство высокотемпературных материалов), когда изменение термомеханических свойств определяется только одним параметром — деформацией изменения объема e_Φ (усадки или расширения), при структурных изменениях указанного типа дается постановка и решение задачи об отслаивании вследствие потери устойчивости структурно-изменившегося слоя в виде длинной полосы или пластины на упругом основании.

Считается, что существует граница, разделяющая полуплоскость или полупространство в свободном ненагруженном состоянии и неоднородном нагреве на две зоны: длинная полоса (плоская пластина) толщиной h , с постоянной температурой T_H , где протекают фазовые превращения в материале, и оставшаяся часть с температурой $T_1 \leq T_H$ структурно-стабильная, между которыми существует упругая связь (упругое основание). При достижении критической деформации слоя образуется в средней части слоя периодическая или двоякопериодическая (в случае полупространства) гармоническая структура с характерным размером h , которой определяется из условия минимума критической деформации при фазовом превращении. Получены конечные формулы для критической деформации при фазовом превращении как функции жесткости слоя и основания и размера h . На основе анализа закритического состояния дается вывод об условиях нарушения сплошности — отслаивания или, как принято в технике, шелушения нагретого слоя.

Дается постановка и решение задачи о концентрации напряжений при контакте двух упругих изотропных четвертей плоскостей с общей вершиной при нагружении их нагрузкой, приводящейся к сжимающей силе P и моменту M .

10 XI 1977. В. А. Пухлий, В. К. Борисов (Москва) *К расчету пустотелых профилированных лопаток радиальных турбомашин.*

Исследуется напряженно-деформированное состояние пустотелых профилированных лопаток радиальных турбомашин в поле действия центробежных сил инерции собственной массы лопаток. Лопатка представляет собою конструкцию, состоящую из двух пологих трапецевидных оболочек, соединенных между собой по входной и выходной кромкам. Для каждой панели лопатки решение строится независимым образом, при этом постоянные интегрирования определяются из условий упругого сопряжения панелей по входной и выходной кромкам. Аналитическое решение задачи основано на применении метода интегральных соотношений А. А. Дородницына и модифицированного метода последовательных приближений (Григолюк Э. И., Попович В. Е., Пухлий В. А. Изгиб сложнагруженных параллелограммных пластин. Изв. АН СССР. МТТ, 1972, № 3). Приводятся результаты расчета лопатки радиального нагнетателя.

17 XI 1977. В. Г. Баженов, А. В. Кочетков, Г. С. Михайлов (Горький) *Численное решение двумерных задач взаимодействия упругопластических тонкостенных конструкций с ударными волнами в жидкости и газе.*

Плоская или осесимметричная задача гидрогазодинамики определяется системой нестационарных дифференциальных уравнений, представленных в виде законов сохранения для идеальной сжимаемой среды. Деформирование тонкостенных конструкций описывается геометрически нелинейной теорией оболочек типа Тимошенко и дифференциальной теорией пластичности с комбинированным упрочнением. В предположении неразрывности нормальной к деформируемой поверхности компоненты массовой скорости с привлечением уравнений динамической совместности получена система нелинейных уравнений относительно скоростей и давлений на контактной поверхности с учетом больших формоизменений элементов конструкции. Разработана методика численного решения данного класса задач, которая основывается на применении явных схем сквозного счета: для среды — схема С. К. Годунова, для конструкции — вариационно-разностный метод. Методика реализована в виде комплекса программ на языке АЛГОЛ.

Проведено исследование, а также сопоставление с теоретическими и экспериментальными результатами по взаимодействию круглой пластины с подводной ударной волной. Получены решения задач взаимодействия цилиндрических оболочек, а также оболочечных конструкций, состоящих из двух коаксиальных цилиндров, скрепленных стрингерами. Рассмотрены варианты заполнения отсеков конструкции водой и воздухом.

24 XI 1977. Г. Н. Вакалов (Москва) *Погружение упругого клина в жидкость.*

Рассмотрено вертикальное погружение в идеальную и несжимаемую жидкость симметричного малокилеватого клина с постоянной скоростью. Гидродинамическое давление определено на основе гипотезы Вагнера с учетом упругих деформаций пластины. Решение получено численным методом с использованием процедуры Бубнова. Найденные результаты сравниваются с имеющимися теоретическими результатами при квазистационарной постановке задачи. Выявлено влияние упругости пластины при определении гидродинамического давления на ее поведение при вертикальном входе в воду. Построено решение справедливо для начального этапа погружения (при этом характеристики реакции достигают максимальных значений).

1 XII 1977. Я. Я. Докторов, Е. З. Король (Москва) *Некоторые задачи оптимизации нагрева термоупругих тел при спекании.*

В изделиях и конструкциях из порошкообразных смесей при обжиге в процессе спекания наблюдается остаточная усадка или разбухание, приводящие вследствие неравномерности распределения деформации по объему к разрушению. При этом эти материалы остаются линейно-упругими, но их термомеханические характеристики (модуль сдвига, модуль объемного сжатия) изменяются в зависимости от температуры и деформации объема при спекании ϵ_c . Деформация объема в процессе спекания зависит от температуры и времени выдержки в диапазоне температур $T_0 \leq T \leq T_h$ (T_0 , T_h — соответственно температура начала и конца спекания) и определяется кинетическим уравнением вида $\partial \epsilon_c / \partial t = Q(\epsilon_c, T)$; для многих материалов функция Q выражается формулой Аррениуса $Q(\epsilon_c, T) = A(\epsilon_c) \exp\{-U/kT\}$ (где U — энергия активации процесса, k — постоянная Стефана — Больцмана, T — абсолютная температура). Связь между напряжениями и деформациями для изотропных и однородных тел определяется соотношениями, предложенными одним из авторов (Изв. АН СССР. МТТ, 1976, № 5. Изв. АН СССР. МТТ, 1977, № 2).

В предположении о независимости теплофизических свойств материала от температуры, деформации усадки и напряженно-деформированного состояния дается постановка задачи об оптимизации нагрева тел при спекании.

В качестве модельных рассмотрен ряд задач осесимметричного нагрева составной двухслойной, свободно деформируемой цилиндрической трубы $a \leq r \leq b$ с границей раздела $r_0 \leq b$.

Решены задачи для сплошного цилиндра и круговой шайбы с нагревом на цилиндрической поверхности, а также двухслойной трубы при неравномерном одностороннем медленном нагреве, когда заранее известно положение наиболее напряженной точки.

8 XII 1977. В. А. Федотчев (Москва) *Решение плоской задачи термопластичности методом конечных элементов.*

Используется метод конечных элементов (МКЭ) в перемещениях. Матрица жесткости и узловые псевдосилы треугольного элемента, порождаемые осевой, температурной и пластическими деформациями, получены в декартовой системе координат.

Характеристики элемента зависят от его температуры и координат. В зависимости от вида граничных условий полная система уравнений МКЭ записывается в декартовой или цилиндрической системах координат. Перемещения находятся по методу квадратного корня. Упругие деформации описываются законом Гука. Пластические деформации определяются интегрированием уравнений термопластичности с трансляционно-изотропным упрочнением. История нагружения учитывается накопленными пластической деформацией ϵ_i^p и смещением центра поверхности

нагружения $a_i^* = \int \sqrt{da_{i1} da_{i2}}$. Предложенный процесс уточнения пластических деформаций на каждом шаге интегрирования позволяет применять и модуль идеально пластического тела. Примеры расчета получены на ЭВМ.

15 XII 1977. Р. А. Васин (Москва), А. Убайдиллаев (Ташкент) *Применение метода СН-ЭВМ к расчету упругопластических цилиндрических оболочек.*

Излагается один из оригинальных путей решения проблемы выбора определяющих соотношений для упругопластического тела при существенно сложном его нагружении — метод СН-ЭВМ (метод полного физического моделирования), предложенный А. А. Ильюшиным [1]. Идея его состоит в совместном использовании при решении задачи вычислительной машины (ЭВМ) и экспериментальной установки (СН) на сложное нагружение тонкостенных трубчатых образцов. Метод рассматривается на примере несжимаемого материала при плоском напряженном состоянии с известными главными осями (x, y, z) .

Приводятся результаты решения конкретных задач о сложном нагружении длинной цилиндрической оболочки, подверженной сосредоточенному кольцевому давлению с последующим приложением растягивающей осевой силы; конечная цилиндрическая оболочка с одним заземленным краем, нагружаемая комбинацией неравномерного внешнего давления, внутреннего давления и осевой силы (в пространстве нагрузок история нагружения представляет двухзвенную ломаную).

Анализируются отличия напряженного и деформированного состояний оболочек в расчетах по первому приближению метода СН-ЭВМ и по деформационной теории. Первое приближение по методу СН-ЭВМ дает в некоторых случаях заметную поправку (до 8% по прогибу и до 20% по деформациям) к нулевому приближению.

22 XII 1977. В. В. Безенина (Москва) *Конечные элементы в теории слоистых оболочек.*

Представлен обзор работ, посвященных решению задач статистики и динамики слоистых оболочек и пластин. В обзор включены работы, опубликованные за последние десять лет. Основное внимание уделяется представлению многослойных конструкций методом конечных элементов. Проанализировано влияние применяемых механических моделей многослойных конструкций на эффективность метода конечных элементов при решении задач. Исследованы предложенные типы конечных элементов для многослойных конструкций с точки зрения точности и сходимости результатов. Отмечены вычислительные трудности, связанные с решением полученных уравнений.

27 X 1977. В. И. Палашин (Москва) *Взаимодействие круговой упругой арки с жесткой полуплоскостью.*

Рассмотрены большие прогибы упругой круговой арки, которая симметрично деформируется жесткой полуплоскостью, нормальной к оси симметрии арки. Деформация арки в своей плоскости описана в рамках гипотезы плоских сечений уравнениями упругой эластичности с учетом растяжимости оси арки.

Установлено, что процесс деформирования делится на три этапа. На первом этапе имеет место контакт арки с плоскостью в одной точке — точке симметрии арки. На втором этапе имеются две симметричные точки контакта, в которых возникают сосредоточенные контактные усилия, причем участок арки между ними прямолинеен и прилегает к полуплоскости без контактных усилий внутри него. На третьем этапе происходит отрыв среднего участка арки от полуплоскости. Необходимым условием отрыва является появление на среднем участке сжимающих усилий, превышающих критические для этого участка. Для появления таковых необходимы определенные размеры и условия закрепления арки.

Процесс деформирования арки прослежен численно. Использован метод продолжения по параметру с применением квазилинеаризации нелинейной краевой задачи для уточнения решения при каждом значении параметра. На первом этапе в качестве параметра принят прогиб арки, на втором и третьем — координата контактной точки, отсчитываемая от оси симметрии арки.

Отмечено, что переход от второго к третьему этапу деформирования осуществляется через точку бифуркации равновесия арки. Для перехода на ветвь, соответствующую отрыву среднего участка, вблизи точки бифуркации вводилась возмущающая нагрузка в виде малой сосредоточенной силы, приложенной на оси симметрии арки.

Получены формы деформированной оси и зависимости контактного усилия и прогибов от положения точки контакта. Рассмотрены шарнирно закрепленные и защемленные арки с центральными углами 45° , 90° , 135° и 180° .

29 XII. 1977. А. В. Бобров (Москва) *Взаимодействие упругих стержней и оболочек с преградами.*

Рассмотрены переходный процесс деформации и распространение упругих волн в упругих стержнях и оболочках, связанных с жесткими массами на торцах, при ударном взаимодействии с абсолютно жесткой и деформируемой преградами. Решение задачи для упругих стержней получено полуаналитическим методом, использующим интегральное преобразование Лапласа-Карсона. При заданных свойствах преграды характеристики реакции определяются путем численного интегрирования обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка. Для анализа переходных процессов в оболочках использовалась нелинейная теория оболочек типа Тимошенко; уравнения движения интегрировались численно на ЭЦВМ по методу прямых. Приводятся результаты расчетов для стержней и оболочек при ударе об абсолютно жесткую и деформируемые преграды, которые моделировались по модели упругого основания Винклера, по приближенной гидродинамической модели льда, по одноосной модели грунта, по одномерной модели жесткопластической преграды. Произведен анализ влияния параметров модели и преграды на характеристики процесса.