

В 67

✓f

**МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
ДОНЕЦКО-МАРИУПОЛЬСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА**

**На правах рукописи
Волков Евгений Иванович**

УДК 539.3

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ
МЕТОД ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНО-
НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ**

Специальность 01.02.03 - Строительная механика

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Киев 1989

**НТБ
ДНУЖТ**

Работа выполнена в Киевском ордена Трудового Красного
значения институте инженеров гражданской авиации
имени 60 - летия СССР

Научный руководитель - доктор технических наук
профессор Веринский В.В.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Мельников В.А.
кандидат технических наук,
доцент Островерхов Н.П.

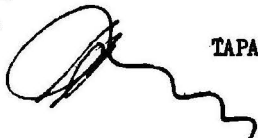
Ведущая организация - Государственный проектный и
научно-исследовательский институт
"Украинпроектотальконструкция"
Минмонтажспецстроя УССР

Защита состоялась " 13 " окт 25/8 1989 г. в 15⁰⁰
часов на заседании Специализированного совета К 114. С7.02
Днепропетровского института инженеров железнодорожного
транспорта /320700, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. акад. В.А. Казан-
яна, 2, ДИИТ/.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Днепропе-
тровского института инженеров железнодорожного транспорта.

Автореферат разослан " 11 " сентяб/8 1989 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета,
кандидат технических наук,
доцент



ТАРАСЕНКО В.П.

НТБ
ДНУЖТ

Актуальность работы. В практику прочностных исследований, выполняемых в процессе проектирования, в последнее время все чаще привлекаются методы расчета инженерных конструкций, позволяющие учитывать нелинейность в поведении материала. Сочетание методов теории упругости и пластичности позволяет существенно дополнить и расширить арсенал средств оценки прочности, жесткости и устойчивости исследуемых инженерных объектов.

Разработка методик и построение эффективных вычислительных процессов уточненного численного анализа инженерных конструкций как на стадии упругого, так и на стадии нелинейного деформирования элементов, создает необходимые предпосылки для выявления дополнительных ресурсов конструкций и представляет новые пути и возможности их оптимизации. Такой подход может рассматриваться как действенное средство повышения интенсивности использования материально-технической базы производства, снижения материалоемкости конструкций и совершенствования их эксплуатационных характеристик. Поэтому разработка и реализация методик, позволяющих использовать в решении физически-нелинейных задач такой современной и эффективный аппарат численных исследований по методу потенциала, является актуальной научной проблемой.

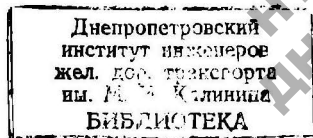
Целью работы является:

- разработка на основе численно-аналитического метода потенциала эффективной методики решения физически-нелинейных задач при сохранении полностью граничной формулировки метода;
- построение на основе полученной методики итерационных алгоритмов решения плоских задач исследуемого класса;
- реализация построенных алгоритмов в виде пакета прикладных программы, ориентированных на исследование реальных конструкций в двумерной постановке.

Научная новизна. Разработана модификация численно-аналитического метода потенциала для исследования напряженно-деформированного состояния сложных объектов с учетом физически-нелинейной работы элементов.

Получены новые интегральные разрешающие соотношения, сохраняющие граничную формулировку метода.

На основе разработанной модификации метода построен итерационный алгоритм решения плоских задач в физически нелинейной поста-



5343a

новке, который реализован в виде программного комплекса с высоким уровнем автоматизации расчета реальных инженерных конструкций. Проведены численные исследования ряда объектов с анализом влияния локальных зон физически-нелинейных деформаций на общую картину непряженно-деформированного состояния.

Достоверность результатов.

Достоверность получаемых на основе разработанной методики результатов подтверждается их сравнением с аналитическими решениями, построенными для канонических объектов, сравнением с известными результатами других исследователей, полученными при рассмотрении характерных объектов с помощью различных численных методов, а также сопоставлением с данными натурных экспериментов.

Практическая ценность.

Практическая ценность разработанной методики и пакета прикладных программы для исследований напряженно-деформированного состояния объектов с учетом физически-нелинейной работы элементов определяется возможностью их применения в практике расчетов реальных инженерных конструкций, используемых в строительстве, машиностроении и других областях техники. Практическую ценность разработки подтверждает реальный экономический эффект, полученный в результате ее применения к расчетам лопатки объектов техники.

Автор защищает:

- разработанную модификацию численно-аналитического метода потенциала для решения физически нелинейных задач, позволяющую сохранить полную граничную формулировку метода;
- разрешающие интегральные соотношения, полученные на основе разработки новой математической модели объекта и применения теории взаимности работ для тел с кусочно-гетерогенными физически-нелинейными характеристиками;
- эффективный итерационный алгоритм реализации разработанной методики решения задач, включающий в себя поиск и уточнение границ зон нелинейных деформаций;
- построенный на базе разработанного аппарата решения физически-нелинейных задач универсальный автоматизированный программный комплекс для численных исследований реальных инженерных конструкций, результаты анализа напряженно-деформированного состояния натурной модели ванкового соединения лопатки с ободом ротора паровой турбины.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 45, 46 научно-технических конференциях Киевского ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительного института (Киев, 1984, 1985), на УШ, IX, X научно-технических конференциях Киевского ордена Трудового Красного Знамени института инженеров гражданской авиации (Киев, 1987, 1988, 1989), на III, IV научно-технических конференциях "Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов" (Калининград 1984, 1986), на V Всесоюзной конференции по статике и динамике пространственных конструкций (Киев, 1985), на II Республиканской научно-технической конференции "Интегральные уравнения и прикладное моделирование" (Киев, 1986), на IX, X научных семинарах "Методы потенциала и конечных элементов в автоматизированных исследованиях инженерных конструкций" (Ленинград, 1988, 1989).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 печатных работах.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 128 страницах машинописного текста включая 9 таблиц и 57 рисунков, список литературы состоит из 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Численные исследования, проводимые в процессе проектирования реальных инженерных конструкций дают возможность детально оценивать напряженно-деформированное состояние этих объектов. Современный уровень развития численных методов и широкое использование ЭВМ позволяют выполнять эксперименты на высокоточных расчетных моделях, переход к которым от реальных объектов требует все меньшее количество постановочных упрощений. Арсенал средств, используемых в практике прочностных исследований, существенно расширяется с привлечением методов теории пластичности. Практической реализации этого направления служат фундаментальные исследования вопросов теории деформации твердых тел за пределами теории упругости. В работах Н.И.Везухова, И.А.Виргера, А.А.Ильшина, Д.Д.Иалева, Н.Н.Малинина, Н.С.Можаровского, В.В.Новожилова, С.Г.Писаренко, В.Прагера, В.В.Соколовского, Р.Хила, Д.Н.Шевченко и др. изложены основные теоретические посылы, законы и уравнения математической и прикладной теории пластичности.

Определяющую роль в развитии прикладных исследований физически-нелинейных проблем играют теоретические работы А.А.Ильшина. В этих работах сформулированы и доказаны основные теоремы о малых деформациях при простом нагружении твердых тел и предложен общий метод решения физически-нелинейных задач. Развитию метода "упругих решений" А.А.Ильшина послужили работы И.А.Виргера, И.И.Ворожита и Ю.А.Красовского, В.С.Ланского, В.М.Панферова, В.Е.Посадыри, И.С.Щуркова и др.

Тщательная теоретическая проработка проблемы и широкие возможности вычислительных средств явились основой успешного применения различных численных методов в качестве универсального инструмента для реальных исследований сложных инженерных конструкций с учетом нелинейной работы элементов.

Вопросы применения и возможности методов конечных элементов и конечных разностей, вариационных и вариационно-разностных методов в решении физически нелинейных задач нашли отражение в работах Н.П.Абовского, А.В.Александрова, Д.А.Аргириса, Д.В.Вайнберга, П.В.Варвака, Я.М.Григоренко, О.Зенкевича, В.Я.Ладеникова, И.Ф.Образцова, В.А.Постнова, В.И.Рвачева, Р.А.Резникова, Л.А.Розина, А.С.Сахарова, А.Л.Синявского, А.Ф.Смирнова, А.П.Синицина, А.Г.Угодчикова, В.И.Феодосьева, А.П.Филина, Н.Н.Шапошникова и др.

Альтернативным направлением для численной реализации методов решения нелинейных задач является группа численных методов, базирующихся на математической теории потенциала. Отличительная особенность применения этих методов к решению задач математической физики и теории упругости заключается в понижении на единицу размерности разрешенных граничных уравнений, по сравнению с размерностями этих задач.

Фундаментальные положения перечисленных методов сформулированы в трудах Н.М.Гюнтера, Н.А.Кильчевского, В.Д.Купрадзе, А.М.Дячунова, С.Г.Михлина, Н.И.Мусхелишвили, С.А.Соболева, Д.И.Шермана и др. Вопросы применения и возможности данной группы численных методов в решении широкого класса прикладных задач, нашли наиболее полное отображение в работах А.Я.Александрова, Б.М.Зиновьева, С.М.Белоносова, П.Бенерджи, Р.Баттерфилда, К.Бреббия, С.Уокера, И.Теллеса, А.Вроубала, В.Д.Вайнберга, А.Д.Синявского, И.В.Вермиского, А.И.Вусатика, А.Я.Петренко, В.В.Савицкого, М.К.Сисенгаллиева, М.С.Спартакса, С.П.Гавели, Д.А.Мельникова, Г.Б.Ковнеристова, Д.Д.Копейкина, В.Г.Коренева, Э.С.Ванцеля, В.Д.Купрадзе, Т.Г.Гегаляна, Т.В.Бурчуладзе, Н.О.Башелейшвили, Б.М.Лисицина, О.В.Лукина, М.Д.Мартыненко, С.Г.Михлина, С.Мунерджи, В.Новацкого, В.З.Партона, П.И.Перлина, П.Риккарделли, И.З.Ройтфарба, Ш.Свердлоу, Т.Крузе, А.Г.Угодчикова, Н.М.Хуторянского и др.

В диссертационной работе, в развитие предложений Савицкого В.В., рассмотрена модификация метода потенциала, позволяющая при решении физически-нелинейных задач полностью сохранить граничную формулировку метода и тем самым расширить возможности его практического применения в численных исследованиях задач рассматриваемого класса.

В первой главе работы представлен объект исследования, занимающий область S и имеющий границу Γ . Рассматриваемый объект находится под действием статически уравновешенной системы внешних сил и реакций связей. При исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) объекта предполагается возможность появления зон физически-нелинейных деформаций S_{nl} . Для описания исследуемых процессов в области S применяются соотношения теории упругости и малых физически-нелинейных деформаций. В работе принята гипотеза об энергетическом критерии наступления предельного упругого состояния. Для аналитического описания зависимости между напряжениями и деформациями на стадиях упругой и нелинейной работы материала рассматриваемого объекта используется индикаторная диа-

грамма в виде двузвенной ломаной.

На основе предложенных Н.А.Кильчевским обобщений принципа взаимности работ построена теорема взаимности. Интегральные разрывные соотношения записаны в форме тождеств Сомильяна, построенных с использованием фундаментального решения Кальвина.

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{me}^{(n)}(K) = & \frac{1}{k^2} \int_{\Gamma} p_i^{(n)}(N) \mathcal{G}_{me}^{(n)} u_i^{(n)*}(K, N) d\Gamma - \int_{\Gamma} u_i^{(n)}(N) \mathcal{G}_{me}^{(n)} p_i^{(n)*}(K, N) d\Gamma + \\ & + \frac{k}{k^2} \int_{\delta} \chi_i^{(n)}(P) \mathcal{G}_{me}^{(n)} u_i^{(n)*}(K, P) dS + \int_{\Gamma} \left(\frac{\sqrt{G}}{2\sqrt{G}} - \frac{k}{k^2} \right) D^{(n)}(N) t_j \mathcal{G}_{me}^{(n)} u_i^{(n)*}(K, N) d\Gamma - \\ & - \int_{\delta} \left[\left(\frac{\sqrt{G}}{2\sqrt{G}} - \frac{k}{k^2} \right) D^{(n)}(P) \right]_j \mathcal{G}_{me}^{(n)} u_i^{(n)*}(K, P) dS, \end{aligned} \quad (I)$$

где $\mathcal{G}_{me}^{(n)}(K)$ - перемещение или напряжение в точке $K \in S$ по направлениям $\{\alpha_k\}$ в исследуемом состоянии;

$\mathcal{G}_{me}^{(n)} u_i^{(n)*}(K, N)$; $\mathcal{G}_{me}^{(n)} p_i^{(n)*}(K, N)$ - перемещения и усилия в точке $N \in \Gamma$ по направлениям $\{n_i\}$ во вспомогательном состоянии, построенном на основе фундаментального решения Кальвина;

$\mathcal{G}_{me}^{(n)}$ - соответствующий дифференциальный оператор, зависящий от вида единичного воздействия, задаваемого в точке $K \in S$ по направлениям $\{\alpha_k\}$;

$u_i^{(n)}(N)$; $p_i^{(n)}(N)$ - перемещения и усилия в точке $N \in \Gamma$ по направлениям $\{n_i\}$ в исследуемом состоянии;

$\chi_i^{(n)}(P)$ - проекции массовых сил в точке $P \in N$ на направления $\{n_i\}$ в исследуемом состоянии;

$D^{(n)}(N)$; $D^{(n)}(P)$ - компоненты дивизора тензора напряжений в точках $N \in \Gamma$ и $P \in S$ в системе $\{n_i\}$ в исследуемом состоянии;

t_j - косинусы внешней нормали;
 $G = E[2(1+\nu)]^{-1}$; $k = E[3(1-2\nu)]^{-1}$ - физико-механические постоянные;

\sqrt{G} - функции интенсивности деформаций в точке в исследуемом состоянии;

(n) - обозначение для компонентов вспомогательных состояний.

Рассмотрена последовательность преобразований (I), позволяющая записать разрешающие соотношения в граничных интегралах. При этом рассматриваемый объект S разделяется на упругую $S_{\text{уп}}$ и нелинейные $S_{\text{нл}}$ подобласти. В подобластях $S_{\text{нл}}$ производится разделение статических внешних воздействий

$$P_i = P_i' + P_i''; \quad X_i = X_i' + X_i'' \quad (2)$$

и на контуре $\Gamma_{\text{нл}}$ с точностью до жестких смещений преопределяются геометрические граничные условия

$$\bar{u}_i = u_i' + u_i'' \quad (3)$$

Последовательное применение интегральных теорем Грина и Остроградского-Гаусса позволяет перейти от соотношений (1) к следующим тождествам

$$\begin{aligned} \bar{u}_{me}^{(\alpha)}(K) &= \int_{\Gamma} P_i^{(\alpha)}(N) \bar{u}_{me}^{(\alpha)} u_i^{(N)*}(K, N) d\Gamma - \int_{\Gamma} u_i^{(N)}(N) \bar{u}_{me}^{(\alpha)} P_i^{(N)*}(K, N) d\Gamma + \\ &+ A_{\Omega}(X_i) + \int_{\Gamma_{\text{нл}}} [u_i^{(N)}(N) - \bar{u}_i^{(N)}(N)] \bar{u}_{me}^{(\alpha)} P_i^{(N)*}(K, N) d\Gamma \\ &- (1 - \frac{6}{G}) \left[\int_{\Gamma_{\text{нл}}} P_i^{(N)}(N) \bar{u}_{me}^{(\alpha)} u_i^{(N)*}(K, N) d\Gamma + A_{\Omega}(X_i'') \right] + \frac{6k - \frac{6}{G} k^2}{Gk^2} A_{\Omega}(G_0''), \end{aligned} \quad (4)$$

где $A_{\Omega}(X_i)$; $A_{\Omega}(X_i'')$ - работа массовых сил X_i и X_i'' на соответствующих перемещениях вспомогательного состояния;

$A_{\Omega}'(G_0')$ - работа обобщенной системы нагрузок представляющих собой компоненты шарового тензора напряжений (G_0') на соответствующих перемещениях вспомогательного состояния.

В интегральных представлениях перемещений и напряжений (4) выражения для определения работ $A_{\Omega}(X_i)$, $A_{\Omega}(X_i'')$ и $A_{\Omega}(G_0')$ выглядят в себя только граничные интегралы.

Во второй главе рассмотрен переход от реального объекта S к его дискретной модели S_k и соответствующая такому переходу замена разрешающих интегральных соотношений (4) их алгебраическими аналогами. Дискретный базисный многогранник S_k строится в результате аппроксимации граничной поверхности Γ объекта

конечным набором элементарных неискривленных граничных базисных фрагментов Γ_k ($k = 1, 2, \dots, n$). Алгебраические аналоги разрешающих интегральных соотношений получаются заменой слагаемых в правой части (4) суммой отдельных интегралов по элементарным граничным базисным фрагментам Γ_k . В пределах каждого такого фрагмента Γ_k принят постоянный закон распределения плотностей эластопотенциалов, а сами эластопотенциалы вычисляются на основе замкнутых аналитических формул. Такой подход позволяет аналогично ускорить процедуру вычисления компонентов алгебраических аналогов соотношений (4) по сравнению с использованием численного интегрирования. Приведены результаты интегрирования всех компонентов, входящих в алгебраические аналоги интегральных представлений перемещений и напряжений трехмерных и двумерных задач.

В третьей главе рассмотрено построение итерационных алгоритмов реализации модифицированного численно-аналитического метода потенциала для решения физически-нелинейных задач. Решение задачи распадается на три основных этапа. На первом этапе решается граничная задача в упругой постановке. Для выполнения этого этапа в соответствии с общей схемой реализации численно-аналитического метода потенциала производится формирование системы алгебраических аналогов разрешающих соотношений

$$[A] \{x\} = \{B\}, \quad (5)$$

где $[A]$ - матрица, коэффициенты которой представляют собой интегральные характеристики перемещений и усилий по дискретному неискривленному базису Γ_k в рассматриваемых вспомогательных состояниях;

$\{x\}$ - вектор неизвестных граничных плотностей эластопотенциалов в рассматриваемых узлах дискретизации;

$\{B\}$ - вектор правых частей, представляющий работы заданных внешних поверхностных и массовых воздействий на соответствующих перемещениях вспомогательных состояний.

Решение упругой граничной задачи позволяет в первом приближении определить геометрию под областей нелинейных деформаций S_{nl} . Положение границы Γ_{nl} определяется проверкой энергетического условия наступления предельного упругого состояния в узлах дискретизации границы Γ и во внутренних точках области S . Во всем множестве узлов дискретизации построенной границы Γ_{nl} , с помощью дискретных аналогов соотношений (4) находятся полные граничные условия (μ_i, P_i) .

На втором этапе расчета в найденных подобластях нелинейных деформаций строятся квазилинейные решения. При этом НДС в каждой подобласти S_m моделируется суперпозицией двух упругих напряженно-деформированных состояний. Для построения такой суперпозиции производится разделение внешних статических воздействий на рассматриваемую подобласть S_m .

В соответствии с рассматриваемой методикой первая часть суперпозиции (P_i', X_i') реализуется в подобласти S_m предельное упругое напряженно-деформированное состояние (простейший вариант такого НДС - простое растяжение или сжатие). Система нагрузок P_i'', X_i'' , действующая на подобласть S_m во второй части суперпозиции, определяется из (2).

Кинематические граничные условия u_i' находятся в результате решения задачи о нагружении подобласти S_m с упругими характеристиками материала системой нагрузок P_i', X_i' . Для определения величин перемещений u_i' рассматривается нагружение подобласти S_m системой нагрузок P_i'', X_i'' , при этом материал тела описывается второй ветвью используемой индикаторной диаграммы. Результирующие перемещения определяются с помощью (3). Найденные таким образом на контуре каждой нелинейной подобласти граничные условия отличаются от тех, которые были получены на первом этапе расчета.

Третий этап расчета включает в себя переопределение граничных условий на контуре Γ рассматриваемого объекта S и уточнение геометрии границ областей нелинейных деформаций S_m . Для решения граничной задачи на третьем и всех последующих этапах используется прием, описанный на первом этапе расчета и строится система дискретных аналогов:

$$[A]\{x_i\} = \{B\} + \{B_i\}, \quad (6)$$

- где $[A]$ - матрица коэффициентов, которая построена на первом этапе расчета;
- $\{x_i\}$ - описываемый во втором приближении вектор неизвестных граничных плотностей эластопотенциалов в рассматриваемых узлах дискретизации;
- $\{B\}$ - вектор правых частей, который получен на первом этапе расчета;
- $\{B_i\}$ - вектор правых частей, представляющий работу обобщенной системы дополнительных нагрузок в точках дискретизации

границ Γ_{aa} подобластей нелинейных деформаций.

После окончания третьего этапа расчета процедура построения решения задачи продолжается повторением второго этапа. Рассмотренный итерационный алгоритм решения физически-нелинейной задачи используется до получения любой наперед заданной точности.

Для оценки достоверности разработанной методики и реализуемого ее итерационного алгоритма проведен расчет толстостенного цилиндра, находящегося под действием наружного и внутреннего давления. Результаты расчетов сопоставлены с известными аналитическими решениями и проанализировано влияние физико-механических параметров на устойчивость и скорость сходимости алгоритма.

В четвертой главе описана логическая структура пакета прикладных программ (ППП), реализующего разработанный аппарат решения физически-нелинейных задач. Для анализа возможностей пакета и оценки достоверности получаемых результатов рассмотрен ряд тестовых примеров, для которых в литературе приведены решения, полученные другими численными методами. В качестве одного из таких примеров рассматривается расчет прямоугольного образца с выточками, работающего в условиях плоской деформации. Такой пример рассмотрен в работе Д.К.Ф.Теллеса с помощью метода граничных элементов (МГЭ). На рис.1 представлены дискретные модели, которые применялись для расчетов МГЭ и численно-аналитическим методом потенциала (ЧМП).

Рассмотрено два варианта нагружения образца. В первом варианте образец растягивался равномерно распределенной нагрузкой

$P = 1.3 \cdot \sigma_T / 2$, где σ_T - обобщенное напряжение, соответствующее точке излома на индикаторной диаграмме. Во втором варианте величина нагрузки составляла $P = 1.4 \cdot \sigma_T / 2$ (рис.2). В дискретной модели МГЭ граница аппроксимировалась 25 граничными элементами и в области рассматривалось 93 внутренних точки. В дискретной модели ЧМП аппроксимировалась только граница области, на которой рассматривалось 33 (42) граничных элемента. С помощью ППП проведен расчет натурной модели замкового соединения лопатки с ободом ротора паровой турбины (рис.3). Рассматриваемый объект состоит из внешней обоймы с фигурным вырезом и вкладыша. Внешняя обойма моделирует обод ротора турбины, а вкладыш - лопатку. В обойме и во вкладыше имеются отверстия, в которые прелускаются детали механизма нагружения. Для расчета выбрана циклически-симметричная часть модели замкового соединения. Граница обоймы аппроксимировалась 190, а границы вкладыша - 132 граничными элементами. Для выполнения первой ите-

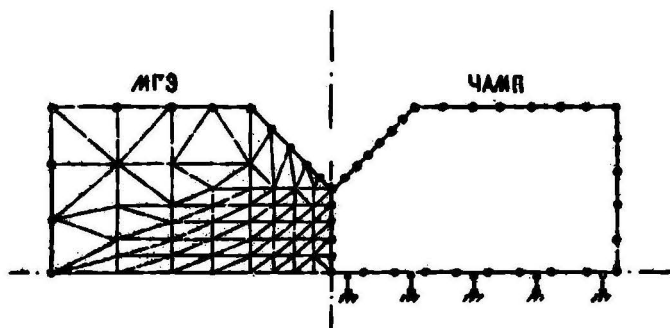
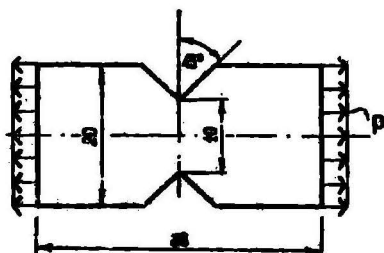


Рис.1. Схема дискретизации образца с выточками

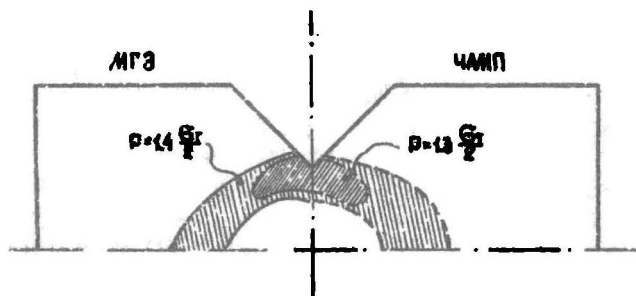


Рис.2. Характер развития зон физически-нелинейных деформаций

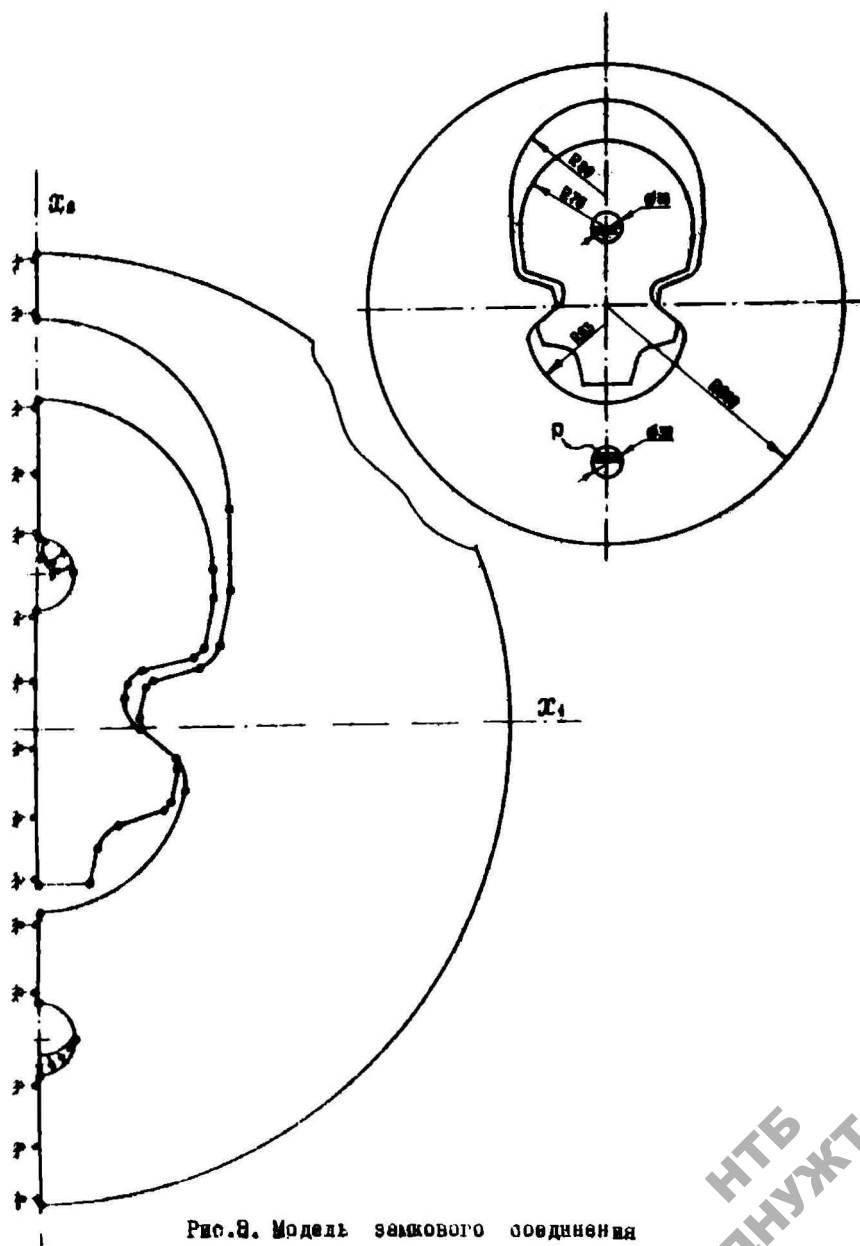


Рис.8. Модель замкового соединения

рации (формирование системы разрешающих уравнений и решение граничной задачи в упругой постановке) на ЕС-1045 было затрачено 38 минут, каждая последующая итерация выполнялась 14 минут. Общее время для выполнения 4-х итераций составило 1 час. 20 минут.

В результате расчета было выявлено 7 локальных зон физически-нелинейных деформаций (рис.4). Для детального анализа напряженно-деформированного состояния хвостовика лопатки паровой турбины, отдельно проведён расчет вкладыша и определены значения компонентов тензора напряжений в 155 внутренних точках. Результаты расчета представлены на рис.5 в виде изолиний интенсивности напряжений σ_i и изолиний компонентов тензора напряжений σ_{ij} .

Проведены сравнения полученных результатов с данными натурных экспериментов. Хорошее согласование результатов подтверждает достоверность используемого аппарата решения физически-нелинейных задач.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы, которые заключаются в следующем:

- разработана модификация численно-аналитического метода потенциала для решения физически-нелинейных задач, позволяющая сохранить полную граничную формулировку метода;
- на основе разработки новой математической модели объекта и применения теоремы взаимности работ для тел с кусочно-однородными физически-нелинейными характеристиками получены новые интегральные соотношения, разрешающие граничные задачи рассматриваемого класса;
- построен эффективный итерационный алгоритм реализации разработанной методики решения задач, включающий в себя поиск и уточнение границ зон нелинейных деформаций;
- произведена оценка достоверности методики и устойчивости реализующего ее алгоритма на основе анализа напряженно-деформированного состояния полого толстостенного цилиндра, находящегося под действием наружного и внутреннего давления при различных значениях флякно-механических параметров;
- на базе разработанного аппарата решения физически-нелинейных задач построен универсальный автоматизированный программный комплекс для численных исследований реальных инженерных конструкций;
- оценена работоспособность программного комплекса и достоверность получаемых с его помощью результатов на основе решения ряда

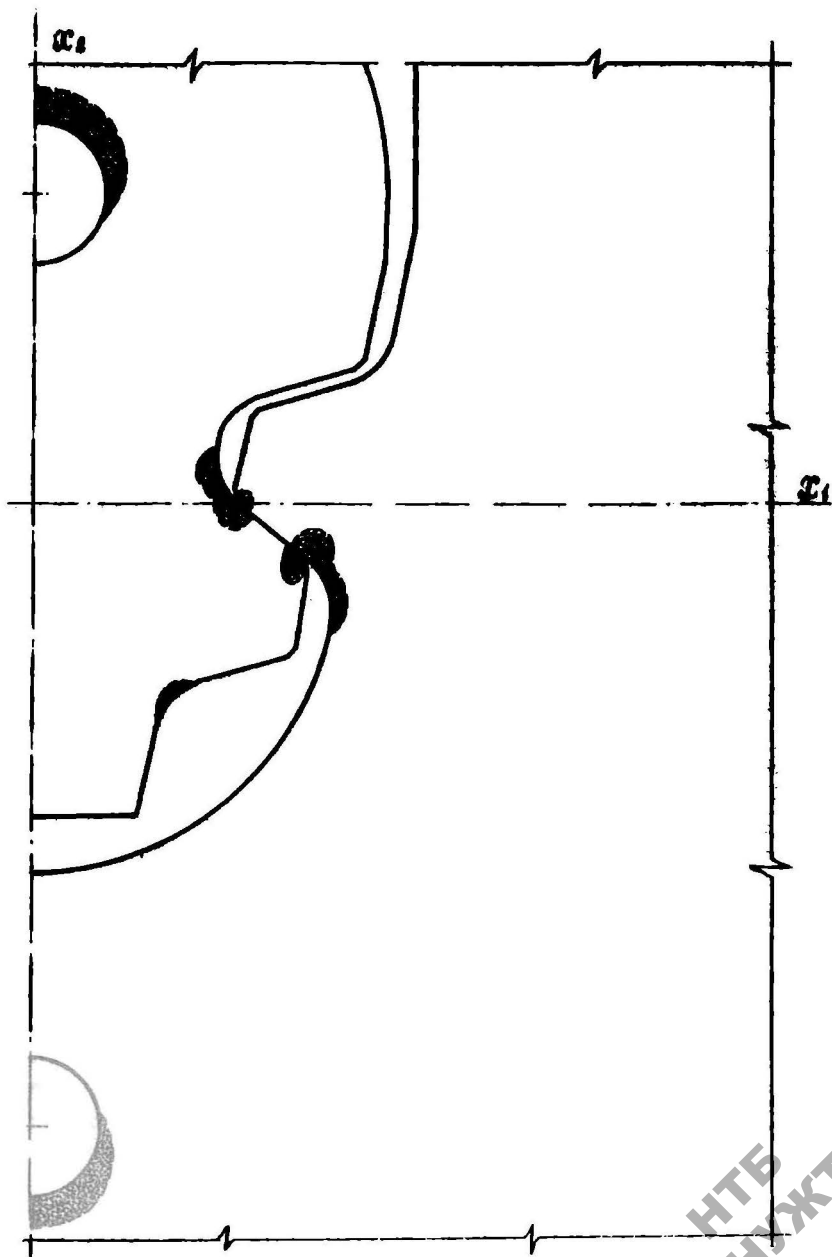


Рис. 4. Развитие зон физически-нелинейных деформаций

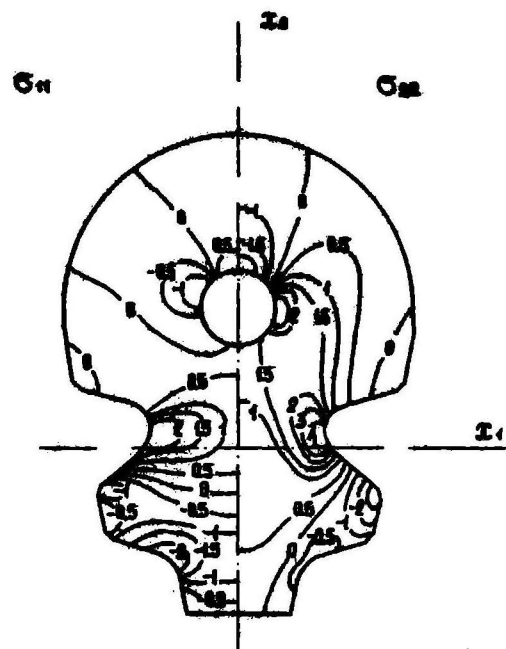
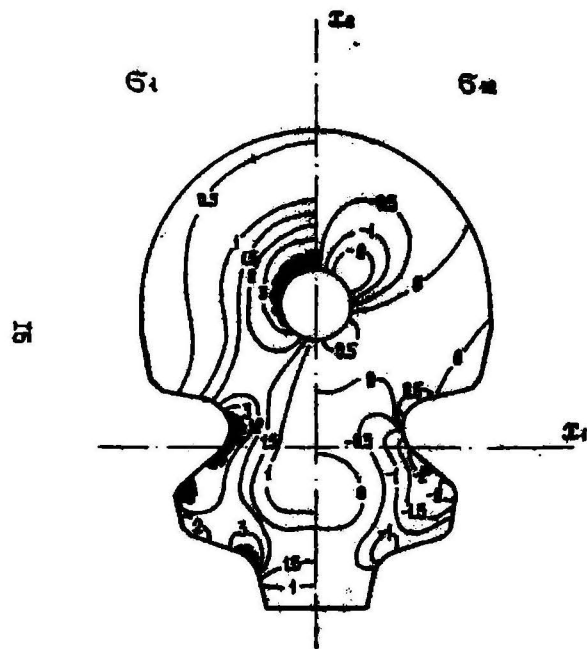


Рис.5. Исходные напряжения

НТБ
ДНУЖТ

тестовых и контрольных примеров, реализованных другими численными методами;

- исследовано напряженно-деформированное состояние натурной модели замкового соединения лопатки с ободом ротора паровой турбины в физически-нелинейной постановке;

- правильность полученных результатов расчетов подтверждается сравнением с данными натурального эксперимента.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Анкянец К.И., Волков В.И., Коцуба А.Н., Петренко А.Я. Применение численно-аналитического метода потенциала для расчета составных конструкций // Научно-техническая конференция по совершенствованию эксплуатации ремонта судов: Тезисы докладов - Калининград: ЦНТИ, 1984. - С.51-53.

2. Волков В.И. Построение алгоритмов решения упруго-пластических задач для трехмерных объектов численно-аналитическим методом потенциала // Всесоюзная конференция по статике и динамике пространственных конструкций: Тезисы докладов - Киев: Киевский инженерно-строительный институт, 1985. - С.47-48.

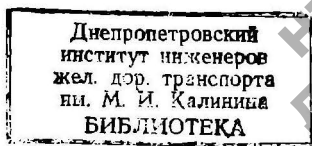
3. Волков В.И., Вусатик А.И., Ясько В.В. Развитие численно-аналитического метода потенциала для решения задач термоупругости // Всесоюзная конференция по статике и динамике пространственных конструкций: Тезисы докладов - Киев: Киевский инженерно-строительный институт, 1985 - С.48.

4. Волков В.И. Использование эффективных алгоритмов реализации численно-аналитического метода потенциала в решении физически-нелинейных задач // Научно-техническая конференция по совершенствованию эксплуатации и ремонта судов Тезисы докладов - Калининград: ЦНТИ, 1986 - С.114.

5. Савицкий В.В., Волков В.И. Численно-аналитический метод потенциала в физически-нелинейных задачах механики деформируемого твердого тела // II Республиканская научно-техническая конференция "Интегральные уравнения в прикладном моделировании": Тезисы докладов - Киев: Институт электродинамики АН УССР - 1986 - С.204-206.

5343a

Зав. Б.П.



Подписано в печать 29.06.89. БЗ 24657. Формат 60 x 84/16.

Бумага для гл.печ. Офсетная печать. Усл.печ.л.0,932.

Тираж 100 экз. Заказ В 732-П^н

Редакционно-издательский отдел и типография ИКИГА.

252058, Киев-58, проспект Космонавта Комарова,1.

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ