# І. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН

Воробьев Ю. С.

Чернобрывко М. В.

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины

УДК 539.3

# ПРОБЛЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ УДАРНО-ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ

Елементи сучасного енергетичного обладнання, нафтопроводів, транспортної техніки та будівельних споруд піддаються дії інтенсивних короткочасних навантажень. Також імпульсні навантаження виникають при техногенних катастрофах. Приводяться приклади аналізу динамічного НДС реальних конструкцій під дією інтенсивних імпульсних навантажень з урахуванням виникнення зон пластичних деформацій та пошкоджень.

Ключові слова: динамічна міцність, імпульсні навантаження, пластичні деформації, швидкісне деформування.

The elements of modern power equipment, oil pipelines, transport technique and building are subject to influence of the intensive brief loading. The same tasks arise up at technogenic catastrophes. Examples of analysis of dynamic stress-strain states of the real constructions are made under the action of the intensive impulsive loading, origin of zones of flowages and damages.

Keywords: dynamic durability, impulsive loadings, plastic deformation, stress- strain rate.

### Введение

Элементы современного энергетического оборудования, нефтепроводов и транспортной техники и строительных сооружений подвержены воздействию интенсивных кратковременных нагрузок. Такие же задачи возникают при природных и техногенных катастрофах.

Создание современных инженерных конструкций, работающих в экстремальных условиях эксплуатации, тесно связано с разработкой теоретических основ и методов расчетных усовершенствования моделей, которые отвечают требованиям надежности и экономичности проектируемых объектов. Указанные проблемы приобретают наибольшую остроту случае высокоскоростной нагрузки. Моделирование их поведения во время нагрузки уточненных, в сравнении с традиционными, математических моделей, которые отвечают структурно-связанным физическим полям конструкционного элемента [1, 2].

Процесс скоростного деформирования протекает как в упругой, так и в пластической стадиях. Экспериментально доказано, что свойства материалов, зависят от скорости деформирования и температурных полей. Сложность процессов скоростного деформирования требует рассматривать трехмерное динамическое напряженнодеформированное состояние и связь его с температурными параметрами. В процессе скоростного деформирования элементы конструкций испытывают деформации, которые нельзя считать малыми, и задача становится геометрически существенно нелинейной. Для математического моделирования таких задач необходим учет изменения деформационных свойств материалов с изменением скорости деформации, влияния температурных параметров и появления зон пластичного деформирования [3].

### Математическая модель задачи

Решение задачи предполагает использование динамических характеристик



материалов, полученных на основе обработки результатов экспериментальных исследований [1, 4]. Эмпирические зависимости между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций, скоростей деформаций, строятся пространственной  $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T)$ . Переход к зависимостям для пластических деформаций осуществляется согласно динамическому пределу текучести  $\sigma_{s\;din}\;$  [1], позволяющему учесть динамическое материала упрочнение результате скоростного деформирования. Выбранная зависимость позволяет учитывать адиабатическое повышение температуры в локальной области больших пластических деформаций, а также изменение скорости деформаций, значения которой определять экспериментально или оценить в результате последующей численной обработки результатов эксперимента [1].

показывают Как предварительные исследования, размеры зоны развития интенсивных динамических напряжений при приложении локальной импульсной нагрузки являются весьма ограниченными [5]. Это дает возможность использовать В этих ограниченных зонах трехмерные модели, учитывающие особенности скоростного упругопластического деформирования, а за ЭТИХ 30H, где напряжения пределами значительно ниже и не достигают предела текучести, используют более простые модели, достаточно полно отражающие геометрическую форму элемента конструкции.

процессов, протекающих локальной области скоростного пластического достаточно сложна. Предсказать деформирования специфику заранее представляется возможным. Именно поэтому скоростного упруго-пластического деформирования элементов конструкций ставится в перемещениях с учетом влияния динамических свойств материалов температурных параметров, а напряжения определяются закону упругого деформирования, пластического согласно изменяющемуся во времени динамическому пределу текучести с учетом деформаций.

Для области, которая моделируется трехмерным телом, уравнения движения имеют вид [6]

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial (\operatorname{div} U)}{\partial x_i} + \mu \Delta U - 3\alpha K \frac{\partial T}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где U — вектор перемещений, T — температура,  $\lambda,\mu$  - параметры Ламе,  $\rho$  - плотность материала,  $\alpha$  - коэффициент теплового расширения, K - модуль объемного сжатия.

Система уравнений (1) для i=1,2,3, дополненная начальными

$$U = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial t} = V_0, \quad T(x_i, t) \Big|_{t=0} = T_0$$
 (2)

и граничными условиями

$$U\Big|_{\Gamma} = f_1(P(x_i, t)), \frac{\partial U}{\partial x_i}\Big|_{\Gamma} =$$

$$= f_2(P(x_i, t)), T(x_i, t)\Big|_{\Gamma} = T_0$$
(3)

позволяет определить компоненты тензора деформаций  $\varepsilon_{ij}$  в нелинейном виде [6]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \tag{4}$$

а интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  и скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_i$  находятся на основании известных выражений [6].

Импульсная нагрузка  $P(x_i,t)$  в граничных условиях (3) рассматривается в виде однократного затухающего во времени импульса, приложенного в ограниченной области  $x_i^{\ 0} < x_i < x_i^{\ N}$ .

Текущая температура при пластическом деформировании определяется из зависимости

$$T(x,y,z,t) = T_0(x,y,z,t) + \frac{f(\dot{\varepsilon}_f)}{c\rho} \int_0^{\varepsilon_f} \sigma_i(x,y,z,t) d\varepsilon_i(x,y,z,t),$$
 (5)

где  $f(\dot{\varepsilon}_f)$  — функция, определяющая часть работы деформации, которая переходит в тепловую энергию; для металлов  $0.8 < f(\dot{\varepsilon}_f) < 1$ .

Компоненты тензора напряжений  $\sigma_{ii}$  и  $\tau_{ij}$  определяются на основании модифицированных зависимостей динамической деформационной теории [7]

$$\sigma_{ii} - \sigma_{0} = \frac{2\sigma_{i}(\varepsilon_{i}, \dot{\varepsilon}_{i}, T)}{3\varepsilon_{i}} (\varepsilon_{ii} - \varepsilon_{0}),$$

$$\tau_{ij} = \frac{\sigma_{i}(\varepsilon_{i}, \dot{\varepsilon}_{i}, T)}{3\varepsilon_{i}} \gamma_{ij},$$
(6)

где  $\sigma_0 = \sigma_{_{ii}}/3$  - среднее значение шаровых напряжений,  $\varepsilon_0 = K\sigma_0 + \alpha T$  - среднее значение шаровых деформаций.

Множитель  $\sigma_i(\varepsilon_i,\dot{\varepsilon}_i,T)/\varepsilon_i$  содержит уравнение состояния  $\sigma_i(\varepsilon_i,\dot{\varepsilon}_i,T)$ , определяющее связь между интенсивностями напряжений  $\sigma_i$  и интенсивностями деформаций  $\varepsilon_i$ , а также их скоростей  $\dot{\varepsilon}_i$  и температурой T, полученные обработкой экспериментальных данных [7]

$$\sigma_{i} = \sigma_{s} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{i}}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] + \sigma_{s} \left\{ \frac{\varepsilon_{i}}{\varepsilon_{s}} - \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{i}}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^{m} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{k}}{T_{p} - T_{k}} \right)^{r} \right], \tag{7}$$

где  $\sigma_s$  - статический предел текучести по напряжениям,  $\varepsilon_s$  - статический предел текучести по деформациям, D, n, m, r - экспериментальные параметры динамических свойств материала,  $T_k$  - температура, при которой проводилось определение характеристик материала,  $T_p$  - температура плавления материала.

Уравнения (6) позволяют определять компоненты тензора напряжений в процессе деформирования, независимо от его упругой или пластической стадии. Использование уравнения состояния в форме (7) дает возможность моделировать, также, и переходную зону между упругим и пластическим деформированием.

В рамках рассматриваемой математической модели зависимости (6) можно заменить зависимостями теории пластического течения [7]

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left[ d\sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{3\mu}{1+\mu} d\sigma \right] +$$

$$+ \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_{i}^{p}}{\sigma_{i}(\varepsilon_{i}, \dot{\varepsilon}_{i}, T)} (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)$$
(8)

Однако, использование зависимостей (8) в переходной зоне не всегда целесообразно [3]. Можно также отметить, что при простом нагружени динамическая деформационная теории дает результаты близкие к результатам, полученным с использованием теории пластического течения [1].

Таким образом, уравнения (1) — (8) позволяют полностью определить параметры напряженно-деформированного состояния конструкционного элемента под действием импульсного нагружения.

## Методология численного решения задачи

Анализ напряженно-деформированного состояния конструкционных элементов энергетического оборудования при ударноимпульсном нагружении проводится в два этапа. Первый этап включает конечноэлементный анализ всей конструкции, позволяющий выявить зоны максимальной локализации напряжений. На втором этапе рассматривается динамическое деформирование локальных зон согласно изложенной методики. Поскольку поставленная динамическая задача носит ярко выраженный нелинейный характер, решение адаптивным методом конечных разностей, при изменяемом в зависимости от градиента величин шаге интегрирования [5], позволяет получить наиболее точное решение в узлах конечноразностной сетки. Также метод конечных разностей позволяет учитывать изменяющиеся во времени динамические свойства материала локальных областях конструкционных элементов. Задача отличается особенностями динамического деформирования элементов конструкций. Они состоят в том, что в отдельных зонах приложения локальных возникают нагрузок большие градиенты перемещений и деформаций. При удалении от приложения нагрузки деформаций и напряжений резко падают, а перемещения не имеют больших градиентов. Поэтому нецелесообразно создавать сетку одного порядка во всей рассматриваемой области, как по пространственным, так и по временным координатам. По этой же причине вместо использования разностей высоких порядков более рационально создавать сетку, адаптирующуюся к условиям деформаций и функций состояния материала в данный момент. В связи с изложенными особенностями

2011

задачи проводится пошаговая линеаризация существенно нелинейной задачи при прогнозировании И коррекции величины каждого шага в пространстве и во времени [5]. Расчет по времени начинается с момента приложения импульсной нагрузки. Поскольку рассматриваемый класс задач относится к **УСЛОВНО-СХОДЯЩИМСЯ.** сходимость конечноразностной схемы проверяется в результате численного эксперимента.

## Анализ динамического напряженнодеформированного состояния элементов конструкций

Входные устройства, корпуса и выходные устройства ГТД, а также корпуса паровых турбин часто подвергаются воздействию ударных локальных нагрузок. Причиной их могут быть как влетевшие частицы, так и фрагменты разрушения лопаточного аппарата [8]. Как отмечалось выше, ротора последствия воздействия ударно-импульсных нагрузок локализовано: максимальные напряжения и деформации развиваются в довольно ограниченной зоне [2, 4], где может происходить скоростное упруго-пластическое деформирование даже И разрушение материала. Поэтому целесообразно проводить многоэтапные исследования с использованием трехмерных моделей.

На первом этапе для оценки возможности разрушения или потери несущей способности корпуса ЦНД турбины при воздействии на него обломком лопатки. В качестве модельного примера

рассматривается процесс соударения со скоростью 315 м/с стального призматического ударника с размерами  $0.2~\mathrm{M}\times0.003~\mathrm{M}\times0.003~\mathrm{M}$  из стали  $15\mathrm{X1M1\Phi}$  с корпусом, который моделируется цилиндрической оболочкой толщиной  $0.016~\mathrm{M}$  и радиусом  $2.~85~\mathrm{M}.$  Материал корпуса — сталь 20.

Численный анализ напряженнодеформированного состояния корпуса после столкновением с обломком, реализованный на основе явной формулировки метода конечных элементов, позволил определить, что максимальные деформации достигаются в момент времени 0,45 мс (за ноль был принят момент соударения). Результаты расчетов для t=0,45 мс представлены на рис. 1 для внутренней стороны цилиндрической оболочки и рис. 2 для ее внешней стороны.

На внешней стороне оболочки хорошо зона локализации эквивалентных напряжений, а на внутренней ее границы нечетки. Максимальные напряжения в месте удара  $\sigma_{a}$  = 133 МПа не достигают статического предела пластичности, котя экспериментальные исследования [9] локального удара по стальной цилиндрической оболочке и динамического поведения стальных материалов свидетельствуют 0 пластических деформаций в зоне ударного взаимодействия. Все это дает основания для дальнейших численных исследованиях с более учетом динамических полным свойств материала.

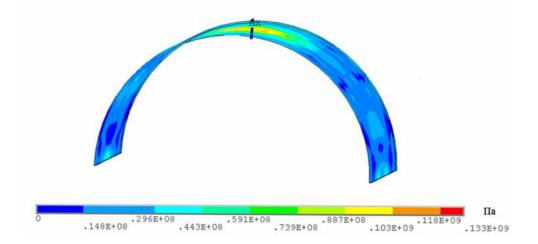
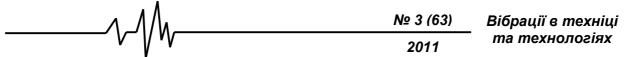


Рис. 1. Напряжения на внутренней стороне оболочки для t = 0, 45 мс



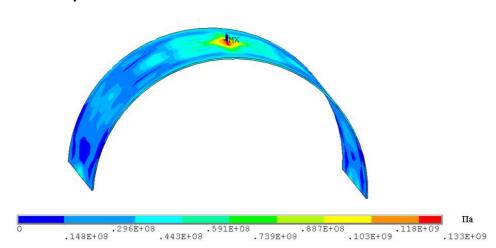


Рис. 2. Напряжения на внешней стороне оболочки для t = 0, 45 мс

Для уточнения временного интервала и линейных размеров зоны исследования рассмотрим деформирование конструкции при различных скоростях соударения и предельных значениях параметров Ламе, когда  $\gamma = 0.3$  для упругой области и  $\gamma = 0.5$  для пластической [1]. В таблице 1. представлены результаты этих исследований.

Как и ожидалось, система при  $\gamma$  =0,5 реагирует на удар медленнее, чем при  $\gamma$  =0,3; в среднем запаздывание происходит на 0,257 мс. Максимальные напряжения, возникающие в системе при  $\gamma$  =0,5 в среднем меньшие на 47.35 МПа.

Таблица 1

Максимальные напряжения

γ	100 м/с		200 м/с		300 м/с	
	$\sigma_{\!\scriptscriptstyle e}$ , МПа	t, MC	$\sigma_{\!\scriptscriptstyle e}$ , МПа	t, MC	$\sigma_{\!_e}$ , МПа	t, MC
0,3	47	0,25	76	0,38	106	0,3
0,5	18	0,7	27	0,5	42	0,5

Анализ полученных данных позволяет сделать качественные выводы о протекании деформационного процесса в зоне ударного взаимодействия. Однако, численные значения представления дают полного интенсивности напряжений и целостности материала В зоне удара, поскольку эквивалентные напряжения все так же в упругости, что противоречит экспериментальным исследованиям [9].

Динамическое напряженнодеформированное состояние в локальной зоне легко рассматривается помощью С разработанной методики (1) (7). Предварительный анализ показал, что достаточно рассмотреть временной интервал

до t=0.5 мс и зону ударно-импульсного взаимодействия 0.005 м  $\times 0.005$  м. На рис. 3 представлены результаты расчета интенсивности напряжений в зоне ударного взаимодействия на внутренней поверхности конструкции.

Анализ результатов расчета показывает, что в центре удара, в зоне  $0,002 \text{ м} \times 0,002 \text{ м}$  возникает пластическое деформировании, однако величина интенсивности напряжений далека от предела прочности. Таким образом, можно сделать вывод, что в результате деформационного процесса в месте удара возникнет наклеп. Появление трещин маловероятно, т.к. относительно длительное

2011

время деформирования не благоприятствует появлению полос адиабатического течения.

### Выводы

Разработаны новые модели и методы трехмерного расчета динамического напряженно-деформированного состояния элементов конструкций действием ПОД кратковременных интенсивных нагрузок. Выявлены новые качественные

количественные закономерности и особенности деформирования скоростного элементов конструкций под действием импульсных ударно-волновых, подвижных и нагрузок: локальных. Среди них следует особо отметить особенности пространственной и временной локализации динамических напряжений. включая зону локальной ударной нагрузки и условия возникновения зон пластичности и разрушения.

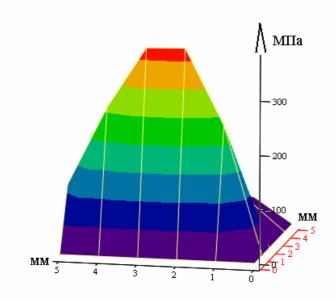


Рис. 3. Интенсивность напряжений в локальной зоне удара

### Литература

- 1. Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В., Севрюков В.И. и др. Скоростное деформирование элементов конструкций. К.: Наук. думка, 1989.- 192 с.
- 2. Воробьев Ю.С., Чернобрывко М.В. Скоростное деформирование элементов конструкций в упругопластической стадии // Проблеми обчи-слювальної механіки і міцності конструкцій. —2010. Вып. 14. С. 87—93.
- 3. Vorobyov Y., Chernobryvko M., Kruszka L. Strain rate deformation and damage of structural elements under local impulsive loadings // Proceedings Seventh International Symposium on Impact Engineering 4 7 July 2010. Warsaw, Poland. P.679-686.
- 4. Степанов Г.В. Упруго-пластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. К.: Наук. думка, 1979. 268 с.
- 5. Воробьев Ю.С., Чернобрывко М.В. Моделирование высокоскоростных деформационных процессов с использованием адаптивных вычислительных методов //

Механіка та машинобудування. — 2009.— № 1 — C. 112-119.

- 6. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. К. : Наук. думка, 1981. 496 с.
- 7. Воробьев Ю.С., Чернобрывко М.В. Основные зависимости для анализа скоростного деформирования элементов конструкций под действием импульсных нагрузок // Методи розв'язування прикладних задач механіки де формівного твердого тіла. 2011. Вип. 12. С. 40-46.
- 8. Гладкий И.Л. Исследование последствий обрыва лопаток авиационных двигателей методом конечных элементов. // Вібрації в техніці та технологіях: 2004, №5(37). С. 38 41.
- 9. Воробьев Ю.С., Чернобрывко М.В., Ярыжко А.В. Нелинейное деформирование конструкций при локальном нагружении // Механіка та машинобудування. 2007. № 1. С. 89 95.