

УДК 621.01

С. У. Джолдасбеков, д-р техн. наук**Е. С. Темирбеков**, д-р техн. наукИнститут механики и машиноведения им. У. А. Джолдасбекова
(г. Алматы, Республика Казахстан, e-mail: temirbekove@mail.ru)**РАСЧЕТ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ РЫЧАЖНЫХ
МЕХАНИЗМОВ С УЧЕТОМ УПРУГОПЛАСТИЧНОСТИ**

Изложен расчет разрушения конечноэлементных моделей конструкций рычажных механизмов. Указано, что в статически неопределимых конструкциях исчерпание несущей способности одного из элементов не вызывает разрушения всей системы, так как остальные элементы образуют неизменяемую систему. Предельное состояние всей конструкции будет достигнуто только тогда, когда исчерпается несущая способность столько элементов, сколько требуется для обеспечения ее геометрической неизменяемости. Эта идея взята за основу расчета и показана на примере ковша экскаватора. Установлено, что упругопластичность более полноценно использует ресурсы прочности конструкции и приводит к экономии материала.

Викладено розрахунок руйнування скінченноелементних моделей конструкцій важільних механізмів. Зазначено, що у статично невизначених конструкціях вичерпання несучої здатності одного з елементів не викликає руйнування всієї системи, оскільки решта елементів утворює незмінювану систему. Граничного стану усієї конструкції буде досягнуто лише тоді, коли вичерпається несуча здатність такої кількості елементів, скільки потребується для забезпечення її геометричної незмінності. Цю ідею взято за основу розрахунку і показано на прикладі ковша екскаватора. Показано, що пружнопластичність більш повноцінно використовує ресурси міцності конструкції та приводить до економії матеріалу.

Как известно, для решения задач с нелинейной упругостью с учетом упругопластических деформаций необходимы три группы уравнений:

1) статические уравнения

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + Y = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0$$

и условия на поверхности

$$\sigma_x l + \tau_{yx} m + \tau_{zx} n = p_x$$

$$\tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{zy} n = p_y$$

$$\tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n = p_z$$

2) геометрические уравнения

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z},$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = 0, \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} = 0, \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x} = 0,$$

$$2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right) = 0, \quad 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) = 0,$$

$$2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) = 0$$

3) физические уравнения

$$\sigma_x = \left(K - \frac{2 \sigma_i}{9 \varepsilon_i} \right) \Delta + \frac{2 \sigma_i}{3 \varepsilon_i} \varepsilon_x,$$

$$\sigma_y = \left(K - \frac{2 \sigma_i}{9 \varepsilon_i} \right) \Delta + \frac{2 \sigma_i}{3 \varepsilon_i} \varepsilon_y,$$

$$\sigma_z = \left(K - \frac{2 \sigma_i}{9 \varepsilon_i} \right) \Delta + \frac{2 \sigma_i}{3 \varepsilon_i} \varepsilon_z,$$

$$\tau_{xy} = \frac{1 \sigma_i}{3 \varepsilon_i} \gamma_{xy}, \quad \tau_{yz} = \frac{1 \sigma_i}{3 \varepsilon_i} \gamma_{yz},$$

$$\tau_{zx} = \frac{1 \sigma_i}{3 \varepsilon_i} \gamma_{zx}, \quad K = \frac{E}{3(1-2\mu)}, \quad \Delta = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3K},$$

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}}{\sqrt{2}},$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + 6(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}}{3}$$

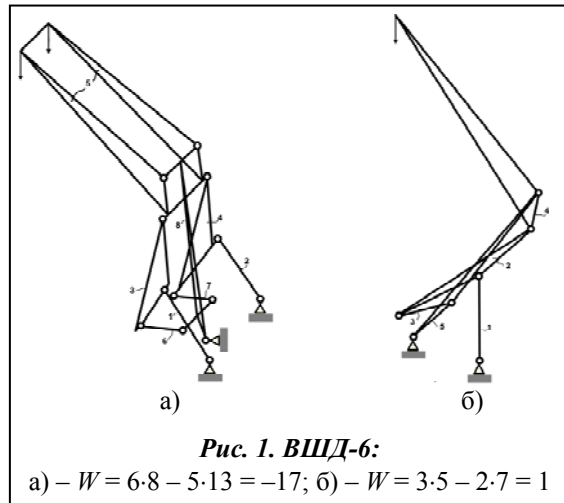


Рис. 1. ВШД-6:

а) – $W = 6 \cdot 8 - 5 \cdot 13 = -17$; б) – $W = 3 \cdot 5 - 2 \cdot 7 = 1$

В данной работе изложен расчет разрушения конечноэлементных моделей конструкций рычажных механизмов. Основная идея заключается в следующем. В статически неопределимых конструкциях исчерпание несущей способности одного из элементов не вызывает разрушения всей системы, так как остальные элементы образуют неизменяемую систему. Предельное состояние всей конструкции будет достигнуто только тогда, когда исчерпается несущая способность стольких элементов, сколько требуется для обеспечения геометрической неизменяемости конструкции. Эта идея заложена в теории Гвоздева, взятая за основу расчета [1]. Теория упругопластичности открывает перспективы более полного использования ресурсов прочности и приводит к существенной экономии материала. Ниже показано, что конструкции стержневых механизмов – много раз статически неопределимы (рис. 1–3).

Расчет ведется итерационным методом путем увеличения внешней нагрузки от нуля до тех пор, пока конструкция, освобожденная от ряда связей из-за образования пластических шарниров, не окажется геометрически изменяемой, что соответствует исчерпанию несущей способности. Необходимо при освобождении от связей учитывать кинематику конструкций. Геометрическая неизменяемость не-

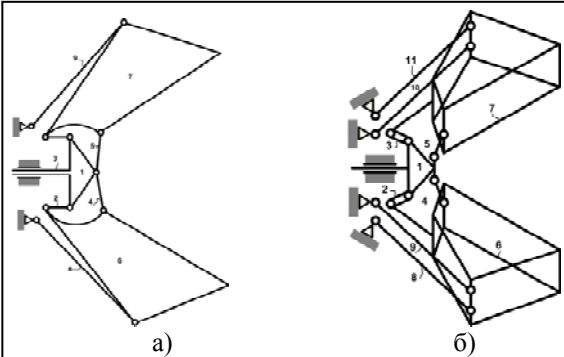


Рис. 2. Грейфер III класса:

а) – $W = 3 \cdot 9 - 2 \cdot 13 = 1$; б) – $W = 6 \cdot 11 - 5 \cdot 17 = -19$

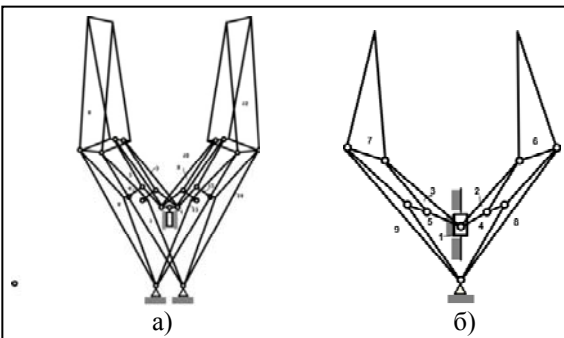
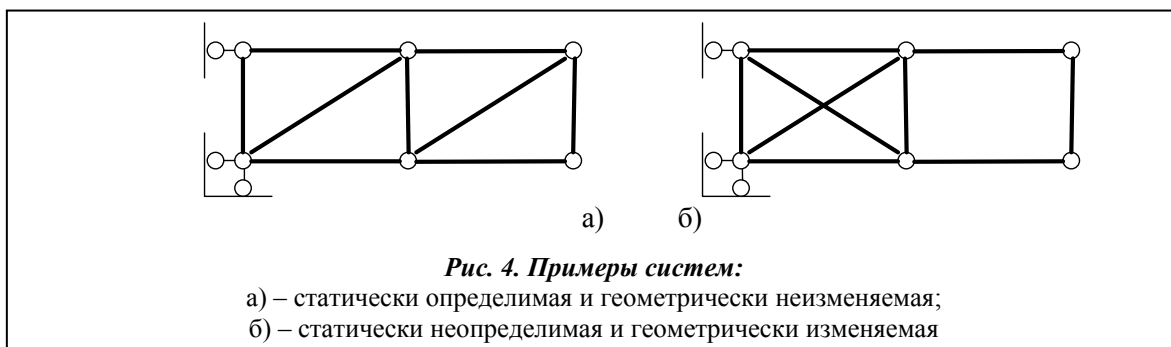


Рис. 3. Грейфер IV класса:

а) – $W = 3 \cdot 9 - 2 \cdot 13 = 1$; б) – $W = 6 \cdot 16 - 5 \cdot 26 = -34$



посредственно не следует из статической неопределимости. Система, имеющая нулевую или даже отрицательную подвижность, с успехом может оказаться геометрически изменяемой. Примером служит, например, рис. 4.

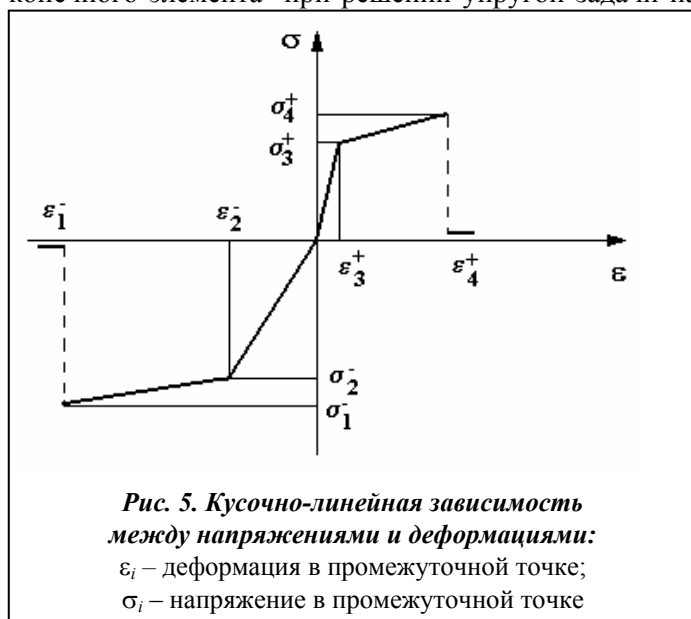
Поэтому при подготовке модели и при расчете необходимо учитывать, что:

1. Хотя конструкции рычажных механизмов могут быть в общем случае много раз статически неопределимыми, их геометрическая неизменяемость не всегда очевидна. По своему назначению – это механизмы, т.е. геометрически изменяемые системы и их неподвижность при расчете методом конечных элементов (МКЭ) обеспечивается только наличием фиксированного в каждом расчетном положении ведущего звена.

2. При упругопластическом расчете конструкций рычажных механизмов МКЭ учитывают нелинейное поведение лишь вспомогательных элементов, движение которых зависит от движения основных стержней, передающих движение конструкции в целом.

Расчет проведен САПР «ЛИРА» [2]. Моделирование физической нелинейности материалов конструкций производится с помощью физически нелинейных конечных элементов, воспринимающих информацию из развитой библиотеки законов деформирования материалов (зависимости $\sigma-\epsilon$). Библиотека законов деформирования позволяет учитывать практически любые физически нелинейные свойства материала. Эта библиотека законов деформирования материала является библиотекой открытого типа и может пополняться новыми законами. В рассматриваемом случае взята кусочно-линейная зависимость между напряжениями и деформациями (рис. 5), характеристики ветви сжатия являются отрицательными числами.

Матрица жесткости линеаризованной физически нелинейной системы формируется на основании переменных интегральных жесткостей, вычисляемых в точках интегрирования конечного элемента при решении упругой задачи на конкретном шаге. Схема численного интегрирования по области конечно-



го элемента и набор используемых жесткостей определяются типом конечного элемента. Для того чтобы получить соответствующий набор интегральных жесткостей, сечение конечного элемента в точках интегрирования дробится на ряд элементарных подобластей. В центрах этих подобластей определяются новые значения физико-механических характеристик материала в соответствии с заданной диаграммой деформирования. На каждом шаге решается линеаризованная задача с формированием векторов перемещений, усилий и новых интегральных жесткостей по касательному модулю для последующего шага.

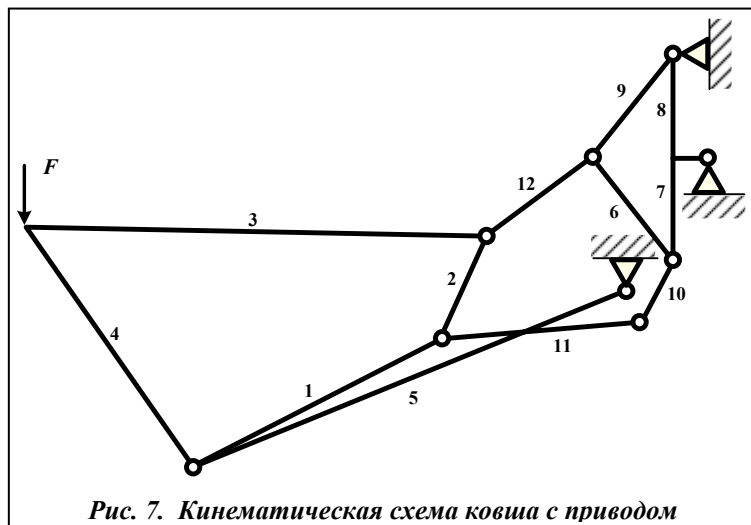


Рис. 7. Кинематическая схема ковша с приводом

Механизм ковша экскаватора

Считаем, что элементы конструкции выполнены из стали Ст3. Предел упругости 220 МПа; предел текучести 223 МПа; напряжение, соответствующее концу площадки текучести 223,2 МПа; временное сопротивление 400 МПа.

Таким образом, закон деформирования будет состоять из четырех участков по два в растянутой и в сжатой зоне, так как в элементах механизмов возникают напряжения разных знаков и это должно учитываться при нелинейных расчетах. На каждом шаге итерационного процесса производится оценка напряженно-деформированного состояния в каждом нелинейном конечном элементе. Оно для стержневых конечных элементов анализируется в поперечных сечениях стержня в точках дробления. Стандартная разбивка кольцевого сечения показана на рис. 6. В рассматриваемом случае взято 5 элементарных колец и 16 элементарных секторов. Предполагается, что элементы механизма выполнены из трубы с внешним диаметром 4 см и внутренним диаметром 3,6 см.

Рассмотрим нелинейное поведение собственно ковша экскаватора, без учета остальных звеньев, приводящих ковш в заданное движение (на рис. 7 ковш изображен в виде цепи 1–4–2–3). Ковш моделируется системой стержневых элементов, соответствующих ребрам жесткости ковша, так как при его работе данные элементы воспринимают основные рабочие нагрузки. Схема привода с ковшом для крайнего нижнего положения дана на рис. 7.

При расчете рассматривались два варианта нагружения ковша – в момент подъема материала (груз находится внизу ковша, что соответствует нагружению узлов 2, 6, 7) и в момент захвата материала (сосредоточенные силы приложены в левом верхнем узле ковша – в узле 1). В данной работе ввиду

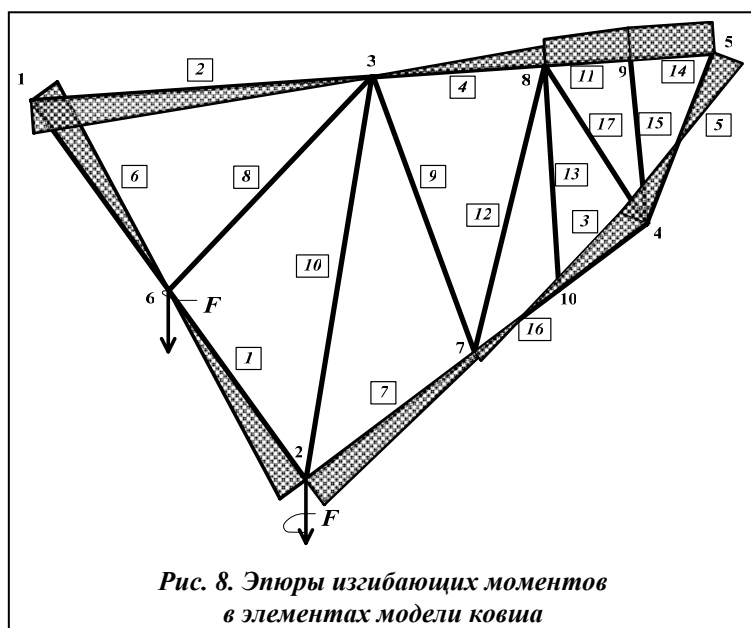


Рис. 8. Эпюры изгибающих моментов в элементах модели ковша

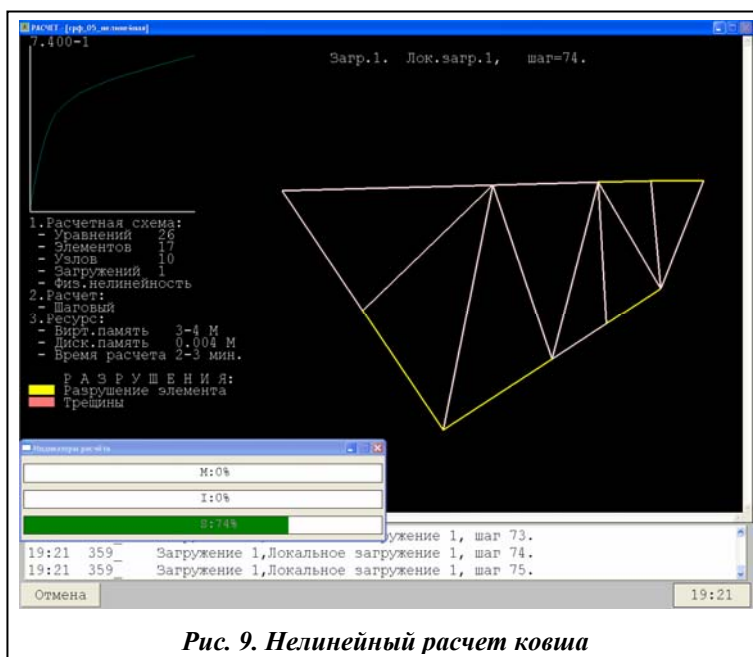


Рис. 9. Нелинейный расчет ковша

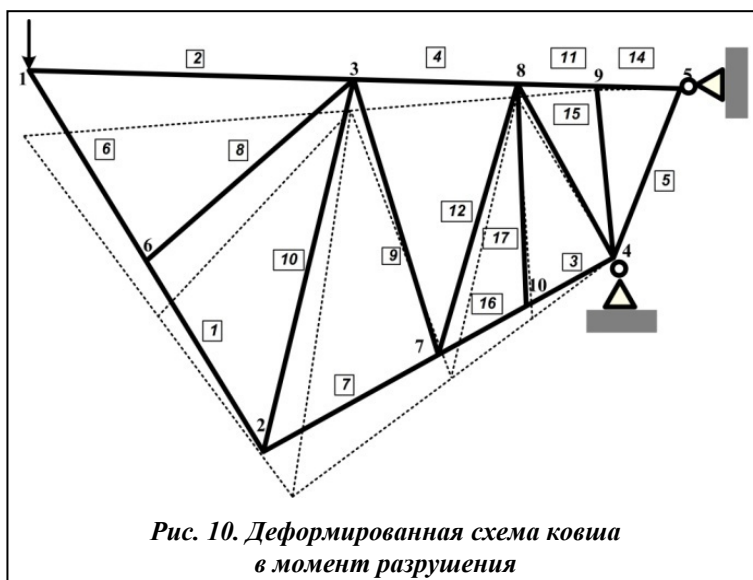


Рис. 10. Деформированная схема ковша в момент разрушения

ограниченности объема статьи показан вариант 1.

Вариант 1 (подъем груза). Линейный расчет ковша показывает, что он работает по аналогии с рамами. В элементах ковша возникают продольные и поперечные силы и изгибающие моменты (рис. 8). Наибольшие изгибающие моменты возникают в элементах 3 и 14, т. е. данные элементы при упругом конечноэлементном расчете определяют несущую способность ковша в целом.

Нелинейный расчет ковша (рис. 9) показывает, что первоначально пластический шарнир возникает в элементе 3, при суммарной нагрузке 3,86 т. Затем при суммарной нагрузке 4,56 т возникает пластический шарнир в элементе 14; при суммарной нагрузке 5,04 т – в элементе 7; при нагрузке 5,84 т – в элементе 11 и при нагрузке 6,16 т происходит разрушение конструкции. Таким образом, с момента образования 1-го пластического шарнира до полного разрушения конструкция внешняя нагрузка увеличивается с 4,56 т. до 6,16 т., то есть на 35%. Форма ковша в момент разрушения изображена на рис. 10.

Литература

1. Ржаницын А. Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материала / А. Р. Ржаницын. – М.: Высш. шк., 1984. – 327 с.
2. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций Лира. Версия 9.0. Руководство пользователя. Книга 1 Основные теоретические и расчетные положения. Некоторые рекомендации. – Киев: НИИ АСС, 2002. – 147 с.

Поступила в редакцию
12.12.11