

А.В. ТУР

Брестский государственный технический университет

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ПРИЛОЖЕНИИ НАГРУЗКИ

В статье рассмотрен метод расчета железобетонных балок при внезапном приложении нагрузки с использованием квазистатических диаграмм "нагрузка - динамическое перемещение".

### ВВЕДЕНИЕ

Как было показано ранее в наших работах [1], в основном все нормативные документы, содержащие требования по проверке конструктивных систем на устойчивость к прогрессирующему обрушению [3, 4], рекомендуют производить взамен нелинейного [3, 4] динамического расчета, квазистатический расчет с использованием постоянного динамического коэффициента  $C_d = 2,0$  к нагрузкам, приложенным к покрытиям и перекрытиям и входящим в особые расчетные сочетания. Как уже подчеркивалось в работе [1], такой подход является корректным только при условии, что конструктивные элементы системы при внезапном удалении колонны (опоры) продолжают работать в упругой стадии. Для наиболее типичных случаев конструктивных систем, выполненных из железобетона и показывающих нелинейную упруго-пластическую реакцию при внезапном удалении колонны, применение постоянного динамического коэффициента может не только существенно завышать результаты расчета усилий, но и приводить к нереальной оценке поведения статически неопределимой конструктивной системы в предельном состоянии.

В особой расчетной ситуации для расчета конструктивных систем при внезапном удалении колонны (опоры) может быть использован альтернативный упрощенный подход, вытекающий из энергетического баланса системы. Основные положения энергетического подхода описаны в работе [1].

Главным допущением такого упрощенного подхода является то, что мгновенное (внезапное) удаление колонны рассматривается подобно эффекту внезапного приложения к конструктивной системе нагрузки, воспринимаемой удаляемым элементом.

При этом возможны два варианта представления результатов решения задачи:

- в виде значений динамических коэффициентов, вводимых для конкретной расчетной ситуации;
- в виде модифицированной квазистатической диаграммы "усилие - динамическое перемещение".

## 1. ПОСТРОЕНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ДИАГРАММ ПРИ РАСЧЕТАХ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ С МГНОВЕННО УДАЛЯЕМЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Теоретические подходы к назначению коэффициентов динамичности по усилиям и перемещения представлены в работе [1].

Рассмотрим более подробно подход, основанный на построении квазистатической диаграммы " $P - u_d$ ", основанный, как и в первом случае на условии энергетического баланса системы. На рисунке 1 приведена графическая иллюстрация предлагаемого подхода для двух уровней нагрузки  $\lambda_1 P_0$  и  $\lambda_2 P_0$  согласно [2].

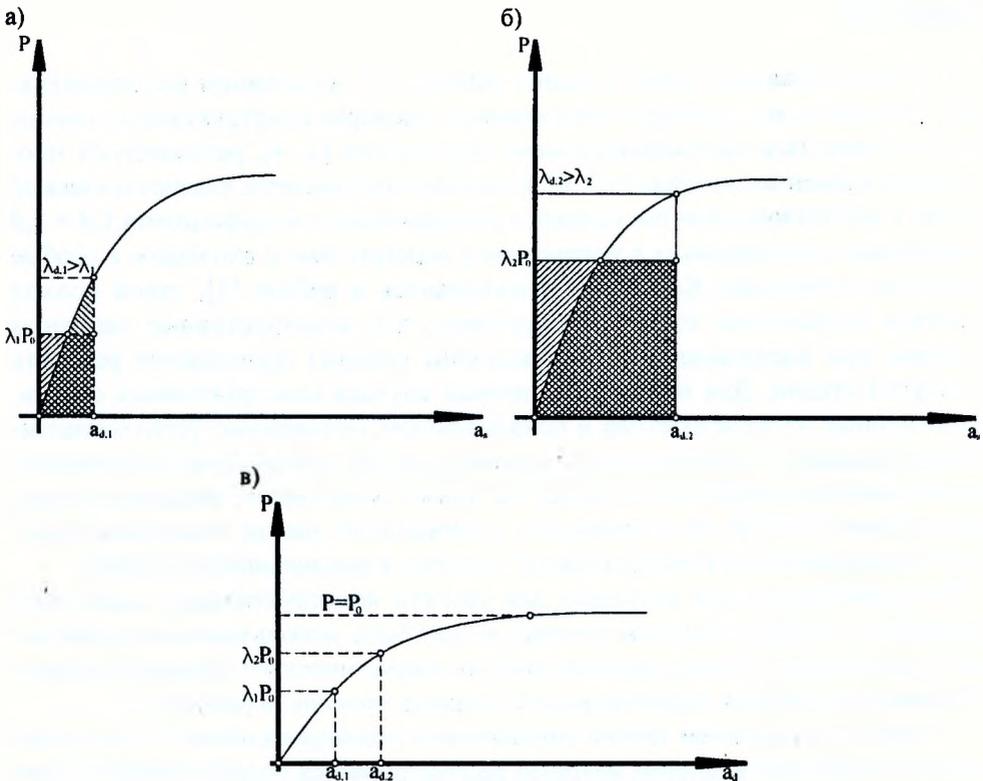


Рис. 1. К построению упрощенной квазистатической диаграммы " $P - a_d$ "  
 а), б) к определению квазистатических реакций при уровнях нагружения  $\lambda_1 P_0$  и  $\lambda_2 P_0$ , в) квазистатическая диаграмма " $P - a_d$ "

В каждом случае с учетом принятого допущения в одной преобладающей форме динамического перемещения при внезапном приложении нагрузки, равенство внешней и внутренней энергии достигается, когда две заштрихованные площади будут равны.

Как было показано в работах [1, 2] внешняя работа  $W_n$ , соответствующая уровню мгновенного приложения нагрузки  $P = \lambda_n P_0$ , приводящей к максимальному динамическому перемещению  $a_{d,n}$  равна:

$$W_n = \alpha \cdot \lambda_n \cdot P_0 \cdot a_{d,n} \quad (1)$$

Из диаграммы статической реакции " $P - a_d$ " конструктивной системы, поглощенная энергия деформации равна:

$$U_n = \int_0^{a_{d,n}} \alpha P da_s \quad (2)$$

В выражении (2) интеграл  $\int_0^{a_{d,n}} \alpha P da_s$  представляет собой площадь, заключенную под кривой " $P - a_d$ " на перемещениях  $a_{d,n}$ .

Тогда, с учетом  $P_n = \lambda_n P_0$  получаем:

$$P_n = \lambda_n P_0 = \frac{1}{a_{d,n}} \int_0^{a_{d,n}} P da_s \quad (3)$$

Таким образом, уровень внезапно приложенной нагрузки  $P_n$ , связанной с максимальными динамическими перемещениями  $a_{d,n}$  эквивалентен средней статической реакции (сопротивлению) для области перемещений  $[0; a_{d,n}]$ .

Тогда для каждого уровня нагружения  $P_n$ , можно установить соответствующее максимальное динамическое перемещение  $a_{d,n}$  и построить квазистатическую кривую " $P - a_d$ ", представляющую собой обобщенную максимальную нелинейную динамическую реакцию системы. Построение такой диаграммы может быть выполнено с использованием простого итерационного алгоритма, основанного на пошаговом приращении динамических перемещений  $\Delta a_{d,n}$  и вычислении соответствующих усилий в соответствии со схемами, показанными на рисунке 1.

Следует подчеркнуть, что представленный выше упрощенный подход является справедливым и дает точный результат для систем, имеющих одиночную динамическую степень свободы (одну преобладающую форму перемещений) с сосредоточенной массой в месте удаляемой опоры в том случае, когда преобладает вертикальное движение массы и горизонтальные силы инерции не учитываются. В принятом подходе эффект вязкое демпфирование системы игнорируется (в отличие от сейсмической реакции), а расчет ограничивается одним полуциклом колебаний, когда достигаются максимальные динамичес-

кие перемещения. Для систем с большим числом динамических степеней свободы (форм колебаний), когда имеет место распределение массы, такой подход является приблизительным при решении традиционных динамических задач. Однако, для случая внезапного удаления колонны, практически всегда имеет место одна преобладающая форма колебаний, приводящая к максимальным перемещениям, что дает основание рассматривать систему с одной динамической степенью свободы. При этом предложенный упрощенный динамический подход обеспечивает явные расчетные преимущества по сравнению с детальным нелинейным расчетом, особенно при анализе сложных конструктивных систем.

## 2. ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

На рисунке 2 показан пример построения динамической диаграммы "P-a". В качестве базовой была принята экспериментальная диаграмма, полученная при статическом нагружении балок сечением 125x225 (мм) длиной 3560 мм, испытанных по методике, приведенной в работе [6].

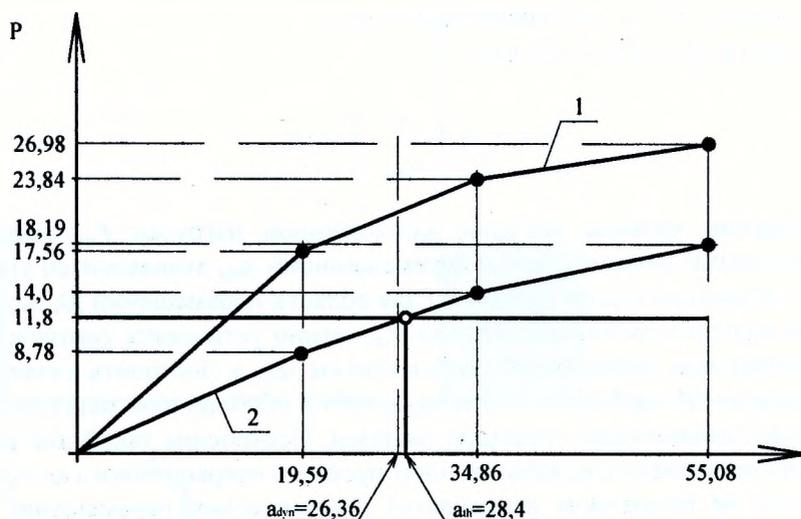
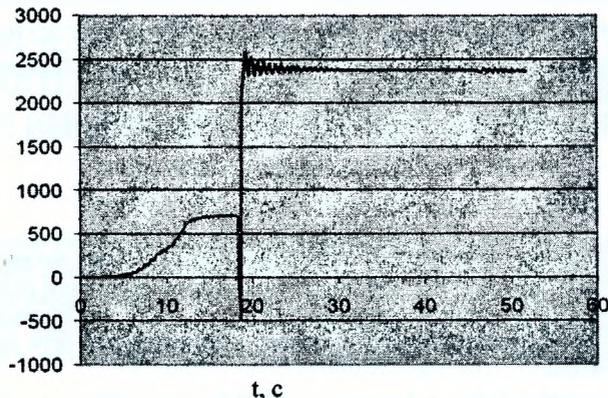


Рис. 2. Диаграммы "нагрузка - прогиб" для опытных балок: кривая 1 - статическая диаграмма "P-a"; кривая 2 - динамическая диаграмма "P-a"

Динамическую диаграмму (кривая 2, рис. 2) строили в соответствии с правилами, изложенными в разделе 1. Полученную теоретическую диаграмму сравнивали с экспериментальными данными, полученными при испытаниях балок в условиях мгновенного приложения сосредоточенной силы в середине пролета по методике [6]. Динамический прогиб для соответствующего уровня нагружения определяли по динамической кривизне, вычисленной из показа-

ний датчиков, фиксировавших относительные деформации в сжатой зоне сечения и растянутой арматуре (рис. 3).

а)

 $\varepsilon_s \times 10^{-6}$ 

б)

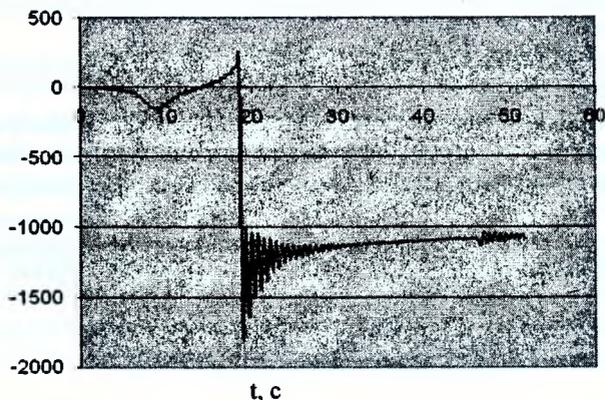
 $\varepsilon_c \times 10^{-6}$ 

Рис. 3. Графики изменения относительных деформаций на арматуре (а) и бетоне (б) в зависимости от времени

Как видно из результатов сравнения (рис. 2) опытные значения динамического прогиба  $a_{dyn} = 26,36$  мм достаточно близко соответствует теоретическому значению, принятому по динамической диаграмме  $a_{th} = 28,4$  мм, установленном при мгновенно приложенной сосредоточенной силе  $P = 11,8$  кН, что соответствовало условиям опыта.

## ВЫВОДЫ

1. Применение энергетического подхода для определения коэффициентов динамичности в особых расчетных ситуациях при внезапном приложении

нагрузки позволяет получить результат, адекватно описывающий поведение железобетонного элемента с учетом изменения его жесткостных характеристик при развитии трещин;

2. При расчете сложных конструктивных систем, критерии наступления разрушения отдельных конструктивных элементов при внезапном удалении колонны (опор) достаточно точно можно проверять с использованием квазистатических диаграмм "M-a<sub>d</sub>", построенных по правилам, изложенным в настоящей статье.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тур А.В., К определению динамических коэффициентов для случая внезапного приложения нагрузки к железобетонным конструкциям на основе энергетического подхода, Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь, Сб. научных трудов/ ПГУ, редкол.: Д.Н. Лозовский (отв. ред) [и др.] - Новополоцк 2008, 116-125.
- [2] Vlassis A.G., Progressive Collapse Assessment of Tall Buildings//Thesis degree Doctor of Philosophy, University of London, London SW72AZ, 2007, 320 p.
- [3] UCF 3-340-01 Design and Analysis of Hardened Structure to Conventional Veapons Effect, Dep. of Defense, Washington, DC, 2002.
- [4] UFC-023-03 (Unified Facilities Criteria) - Design of Buildings to Resist to Progressive Collapse, Jan., 2005, 216 p.
- [5] Исследовать поведение каркасных систем зданий при особых воздействиях и разработать разделы рекомендаций по расчету монолитных каркасных систем к прогрессирующему обрушению применительно к условиям Республики Беларусь: научно-технический отчет, научн. рук. В.В. Тур, гр №: 2008 4273, БрГТУ, Брест 2008, 502 с.
- [6] Тур А.В., Расчет железобетонных балок при внезапном приложении нагрузки с использованием квазистатических диаграмм "нагрузка - динамическое перемещение", Вестник БрГТУ 2009, № 1(55): Строительство и архитектура, 109-116.