

## ПРИБЛИЖЕННЫЙ СПОСОБ УЧЕТА НЕЛИНЕЙНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ КОНСТРУКЦИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В.П. АГАПОВ, *докт. техн. наук, проф.* \*

Ю. А. БАРЫШЕВА, *студент* \*\*

\**Московский государственный технический университет «МАМИ»*

\*\**Московский государственный строительный университет*

В связи с повышением требований к качеству расчета и проектирования строительных сооружений, возводимых в сейсмоопасных районах (см., например, [1], стр.5, п.2.2.б), становятся актуальными разработка и внедрение методик учета нелинейности деформирования при расчетах конструкций на сейсмические воздействия. Ни в одной из программ, нашедших широкое применение в отечественной практике расчета строительных конструкций, данная задача к настоящему времени не решена с учетом требований строительных норм и правил РФ. В данной работе предлагается приближенный способ учета нелинейности деформирования в расчетах на воздействия, заданные инструментальными или синтезированными акселерограммами. При этом используются ранее разработанные и реализованные в вычислительном комплексе ПРИНС алгоритмы линейного расчета на вынужденные колебания во временной области, с одной стороны, и алгоритмы нелинейного статического расчета, с другой [2,3].

В предлагаемой методике используется следующая последовательность вычислений. На первом этапе составляется и решается система линейных дифференциальных уравнений

$$[M]\{\ddot{u}(t + \Delta t)\} + [D]\{\dot{u}(t + \Delta t)\} + [K]\{\Delta u\} = -[M]\{\Delta \ddot{u}_o\} + [M]\{\ddot{u}(t)\} + [D]\{\dot{u}(t)\} \quad (1)$$

где  $[M]$  – матрица массы,  $[D]$  – матрица демпфирования,  $[K]$  – матрица жесткости,  $\{u\}$  – вектор перемещений,  $\{\Delta \ddot{u}_o\}$  и  $\{\Delta u\}$  – векторы приращений ускорения основания и перемещений при переходе конструкции из состояния в момент времени  $t$  в состояние в момент времени  $t + \Delta t$ .

Система уравнений (1) решается шаговым методом в заданном временном интервале с шагом по времени  $\Delta t$ . Для каждого момента времени вычисляются полные значения ускорений в узлах расчетной схемы конструкции и соответствующих им инерционных сил. Полученные значения анализируются и фиксируются максимальные значения инерционных сил. Эти значения принимаются в качестве нагрузки для последующего нелинейного статического расчета.

На втором этапе проводится нелинейный статический расчет с использованием уравнения (см.[4]):

$$[K_{\dot{O}I} + K_u + K_\sigma + K_{NL_1} + K_{NL_2}]\{\Delta u\} = \{\Delta P\}, \quad (2)$$

где  $[K_{\dot{O}I}]$ ,  $[K_{NL_1}]$ ,  $[K_{NL_2}]$  – матрицы жесткости нулевого, первого и второго порядков,  $[K_u]$ ,  $[K_\sigma]$  – матрицы начальных перемещений и напряжений,  $\{\Delta u\}$  – вектор приращений узловых перемещений,  $\{\Delta P\}$  – вектор приращений узловых сил, соответственно. При этом нелинейная статическая задача решается методом приращений при использовании модифицированных лагранжевых координат, что приводит уравнение (2) к виду:

$$[K_{\dot{O}I} + K_\sigma + K_{NL_1} + K_{NL_2}]\{\Delta u\} = \{\Delta P\}, \quad (3)$$

Матрица  $[K_{\dot{O}I}]$  зависит от упруго-пластических свойств материалов и от шага к шагу нагружения пересчитывается. Величина шаговой нагрузки в нелинейном статическом расчете находится как  $1/n$  часть максимальной инерцион-

ной нагрузки, найденной на первом этапе решения задачи. Число  $n$  шагов для нелинейного статического расчета определяется расчетчиком.

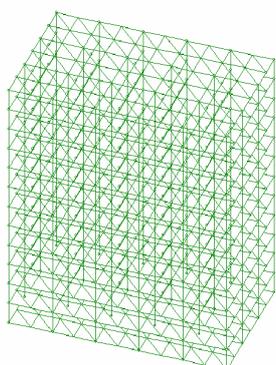


Рис.1. Расчетная схема каркаса здания

В качестве примера использования предложенной методики проведен расчет каркаса железобетонного двенадцати этажного здания (рис.1) на сейсмические воздействия интенсивностью 7, 8 и 9 баллов.

Диаграммы деформирования бетона и арматуры задавались в соответствии с требованиями строительных правил [5] в виде трех- и двухлинейных графиков. Расчеты по предложенной методике показали, что здание с принятыми параметрами по прочности выдерживает землетрясение интенсивностью 8 баллов, но разрушается при 9-ти балльном воздействии.

На рис.2, а, б, в показаны схемы образования трещин на нижней поверхности плит перекрытия для воздействий 7, 8 и 9 баллов, соответственно, причем рис. 2, в

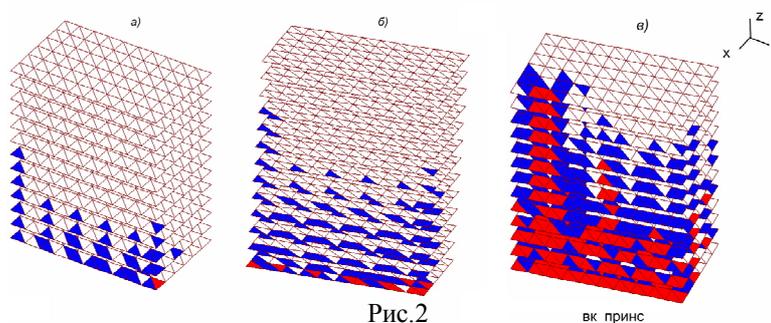


Рис.2

вк принс

соответствует моменту, предшествующему разрушению. Перемещения, найденные с учетом нелинейных эффектов, оказались существенно больше значений, найденных из линейного расчета. Горизонтальное перемещение в направлении оси  $X$  на уровне плиты перекрытия двенадцатого этажа при воздействии 7 баллов из линейного расчета составило 9,5 см, а из нелинейного – 18,6 см.

Расчетная схема содержала 1361 узел, число уравнений равнялось 5775, при этом время решения задачи на персональном компьютере типа IBM PC составило 30 минут. Таким образом, предложенная и реализованная в ВК ПРИНС методика может послужить эффективным и полезным инструментом исследования нелинейных эффектов при сейсмических воздействиях на стадии предварительного проектирования конструкций.

#### Л и т е р а т у р а

1. СНиП II-7-81\*. Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах. – М., 1991.
2. Агапов В.П., Минаков С.А. Статический расчет железобетонных плит с учетом пластических деформаций и трещинообразования при нагружении и разгрузке методом конечных элементов. - Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – Межвузовский сборник научных трудов, вып.9.- М., Изд. АСВ, 2000.
3. Агапов В.П. Реализация расчетов на вынужденные колебания в вычислительном комплексе ПРИНС.- Строительная механика строительных конструкций и сооружений. – Межвузовский сборник научных трудов, вып.11.- М., Изд. АСВ, 2002.
4. Агапов В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости конструкций. – М., изд. АСВ, 2005.
5. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. – Москва, 2005.