

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА И ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ В ОБЩЕМ СЛУЧАЕ АНИЗОТРОПИИ И СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Дорофеев В.С., Коломийчук Г.П. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Разработан алгоритм расчета несущей способности несовершенных пологих прямоугольных железобетонных оболочек двоякой кривизны.

Оболочечные конструкции рассчитываются различными методами теории упругости, пластичности и предельного равновесия.

Широко применяемый аппарат линейной механики позволяет определить напряженно-деформированное состояние оболочек с немалой погрешностью, так как реальные конструкционные материалы /бетон, арматура и прочие/, из которых они изготавливаются, деформируются нелинейно. Особенно ощутима эта погрешность при высоких уровнях нагружения [1].

Полный расчет оболочек /как на прочность так и на устойчивость/ должен производиться с учетом трех видов нелинейности: геометрической, физической и конструктивной [2]. Однако, как отмечалось [2], конструктивная нелинейность в общем случае не зависит от других видов нелинейностей, что позволяет при расчете оболочек совместно учитывать только геометрическую и физическую нелинейности.

Поскольку учет этих двух видов нелинейностей значительно усложняет получения решения, обычно рассматриваются частные случаи, в которых в зависимости от принятых предпосылок учитывается либо геометрическая, либо физическая нелинейность, поэтому в такой постановке выполнено сравнительно немного исследований.

Для моделирования, поведения железобетонной оболочки покрытия при нагружении равномерно распределенной внешней нагрузкой используем усовершенствованный метод последовательных приближений. Решение задачи шагово-итерационным методом с некоторой модификацией позволяет наиболее полно отразить нелинейный процесс деформирования оболочки в следующих стадиях ее работы: упругой, упруго-пластической, с трещинами при упругой работе арматуры; с трещинами после появления пластических деформаций в арматуре.

На первом шаге принимаем: нагрузку, соответствующую упругой работе оболочки; поле начальных несовершенств формы срединной поверхности (в процессе расчета постоянно); начальные приближения (поле перемещений) для решения системы нелинейных алгебраических уравнений с переменными коэффициентами (рис. 1).

Полученное решение анализируется на появление упруго-пластических деформаций в бетоне и на образование трещин в бетоне [3]. Если данная нагрузка не вызывает появления трещин то процесс повторяется для новой ступени нагружения, используя метод движения по параметру [4]. В противном случае заполняется поле перемещений (обозначим его через W_{n-1}) и вычисляются усилия, по которым в зависимости от стадии работы оболочки в рассматриваемой точке определяются соответствующие жесткостные коэффициенты физических соотношений D_{n-1} [3] с применением внутреннего процесса микроитераций. По полученному полю жесткостных коэффициентов D_{n-1} снова решается система нелинейных алгебраических уравнений и определяется новое поле перемещений W_n .

Если поле перемещений W_n отличается от поля перемещений W_{n-1} на величину больше заранее заданной точности /отличная от точности решения системы нелинейных уравнений/, то применяется метод неполной релаксации [4]. Коэффициенты релаксации при неизвестных W_i определяются по методу наименьших квадратов по трем предыдущим значениям векторов. Такой подход дает возможность сглаживать процесс возмущения поля усилий. Аналогичные вычисления следуют одно за другим до перераспределения концентратора напряжений на соседние точки конечно-разностной сетки математической модели оболочки.

В каждом вычислении определяется стадия работы оболочки и анализируются условия образования схем пересекающихся и непересекающихся трещин. Если в точке возникла одна трещина, то ее направление запоминается, и при следующих вычислениях оно фигурирует как известное. Оболочка в этой точке продолжает работать с одной трещиной и в случае разгрузки, когда условия трещинообразования не нарушаются.

После окончания вычислений для одного шага нагрузки переходим к следующей ступени нагружения, используя метод движения по параметру, на которой процесс повторяется, начиная с вычисления жесткостных коэффициентов по деформациям в зависимости от стадии работы точки конечно-разностной сетки оболочки.

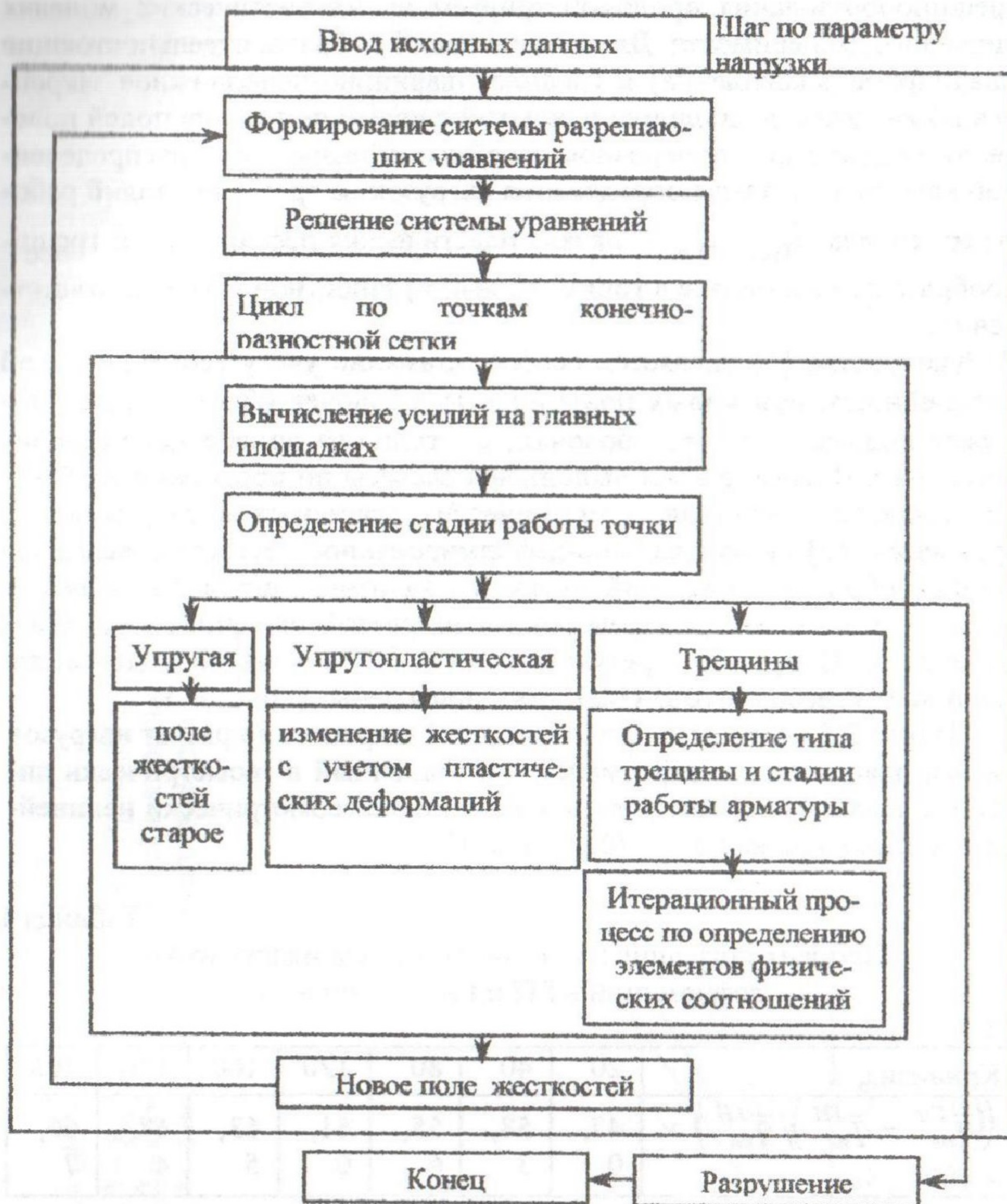


Рис. 1. Укрупненная схема программы расчета несущей способности несовершенных пологих прямоугольных железобетонных оболочек двойкой кривизны NESSPO

Разработанный алгоритм расчета пологих железобетонных оболочек двойкой кривизны в нелинейной постановке с учетом процесса

трещинообразования продемонстрируем на математических моделях числового эксперимента. Для исследований выбраны отдельностоящие (шарнирное закрепление) и средние (шарнирно-неподвижное закрепление) квадратные оболочки покрытий с целью получения полей поведения моделей при поперечном нагружении равномерно распределенной нагрузкой, а также определения нагрузок на границах стадий работы материала: $\bar{q}_{пл}$, \bar{q}_m – начала пластических деформаций и трещинообразования в бетоне в точках конечно-разностной сетки, соответственно.

В Руководстве [5] уделяется особое внимание учету геометрической нелинейности при малых подъемностях оболочек ($f/\delta \leq 6$; здесь: f – стрела подъема в центре оболочки, δ – толщина поперечного сечения оболочки). В связи с этим выполнены расчеты по программе NESSPO для выявления влияния геометрических слагаемых в разрешающих уравнениях [3] на напряженно-деформированное состояние железобетонных оболочек покрытий двойкой кривизны, нагруженных вертикальной равномерно распределенной нагрузкой при разных условиях на контуре. Полученные результаты для оболочек малой подъемности и двух классов бетона (В25, В60) приведены на рис. 2, 3.

Из рис. 3.6 видно, что при шарнирном закреплении расчет нагрузок начала пластических деформаций, выполненный в геометрически линейной постановке, завышен по сравнению с геометрически нелинейной постановкой на 50 – – 70% (табл. 1).

Таблица 1

Процент погрешности нагрузки начала пластических деформаций в ГН и ГЛ постановках

Кривизна, \bar{k}	20	40	80	120	160	180	200
$\left(\frac{\bar{q}_{пл}^{ГЛ} - \bar{q}_{пл}^{ГН}}{\bar{q}_{пл}^{ГН}} \right) \times 100\%$, %	47,0	58,3	55,6	61,0	63,5	68,4	66,7

Если рассмотреть поля поведения моделей оболочек равной подъемности в разных постановках (рис. 4), то видно, что не только количественные характеристики нагрузки разные, но и качественная картина состояния модели другая.

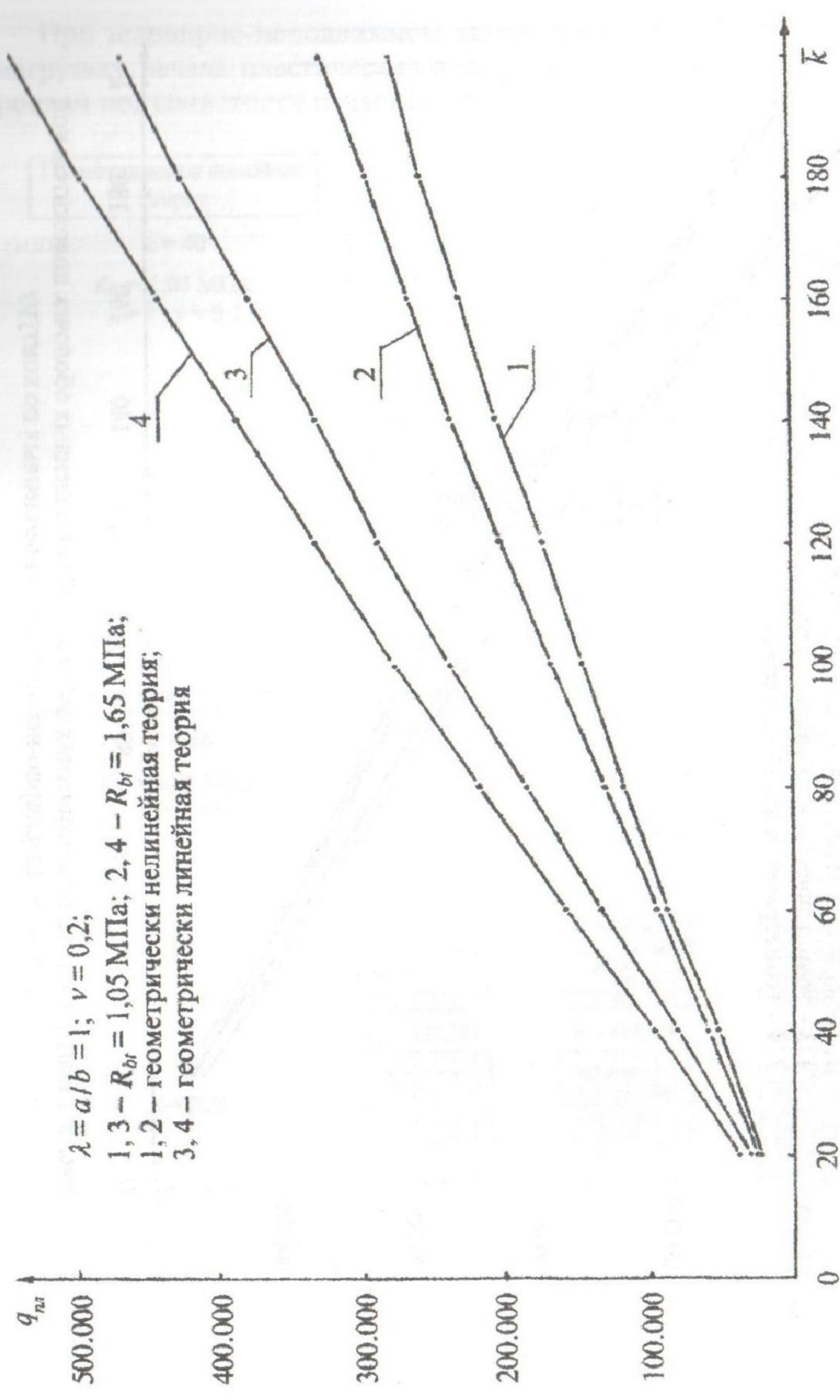


Рис. 2 . Нагрузка начала пластических деформаций совершенных оболочек положительной кривизны шарнирно закрепленных по контуру

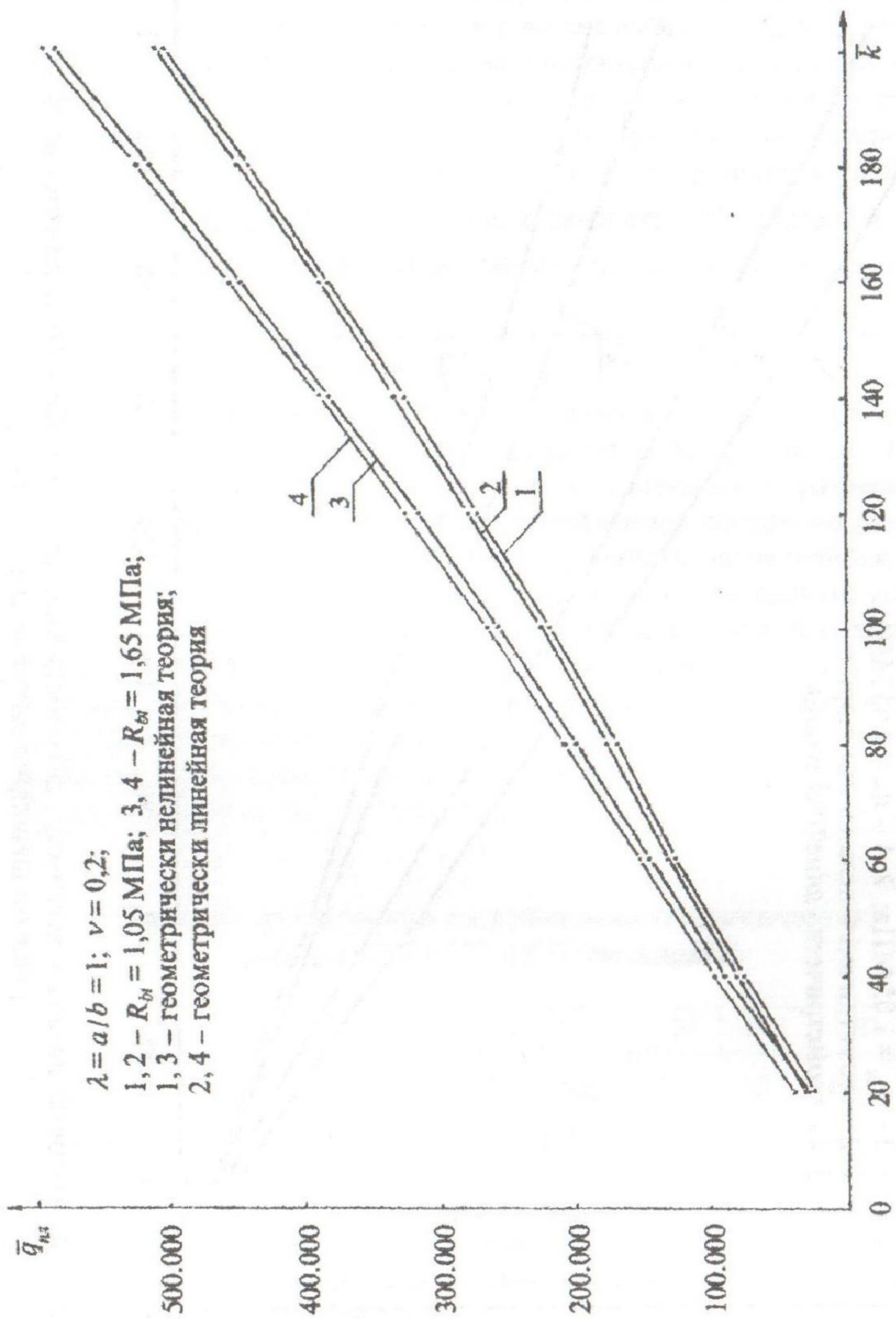


Рис. 3. Нагрузка начала пластических деформаций совершенных оболочек положительной кривизны шарнирно-неподвижно закрепленных по контуру

При шарнирно-неподвижном закреплении (рис. 3) расхождение в нагрузках начала пластических деформаций для разных постановок с ростом подъемистости падает (табл. 2).

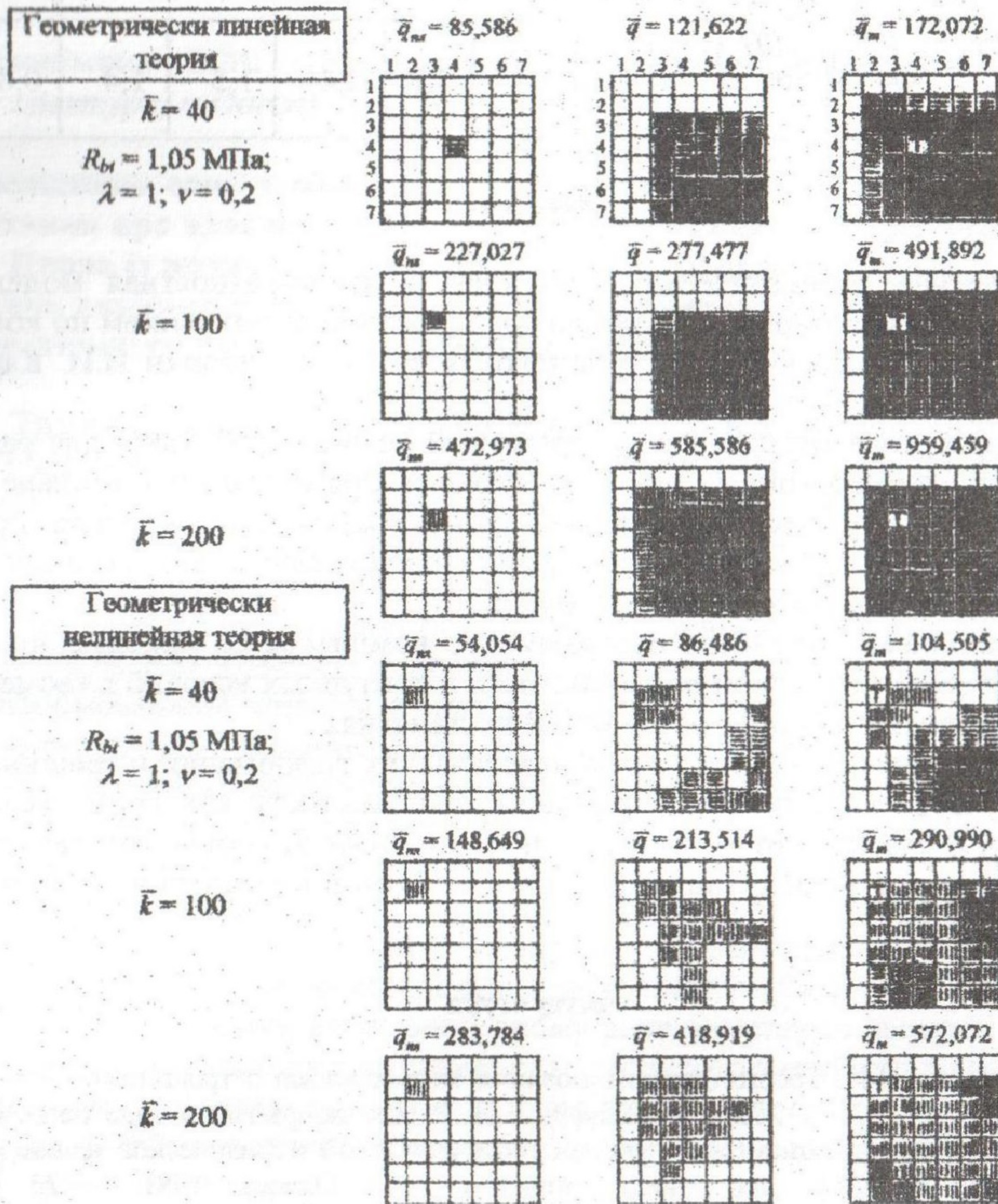


Рис. 4. Стадии поведения железобетонных пологих оболочек для разных постановок и кривизн при шарнирном закреплении. Условные обозначения: – пластика в нижней зоне; – пластика в верхней зоне; – трещина; – пластика в нижней и верхней зонах поперечного сечения.

Таблица 2

Процент погрешности нагрузки начала пластических деформаций
в ГН и ГЛ постановках

Кривизна, \bar{k}	20	40	80	120	160	180	200
$\left(\frac{\bar{q}_{ГЛ} - \bar{q}_{ГН}}{\bar{q}_{ГН}} \right) \times 100\%, \%$	20	7,4	3,8	2,4	1,5	1,4	0,8

Выводы

1. Записана геометрически нелинейная конечно-разностная модель пологой несовершенной оболочки с различным опиранием по контуру для локально-анизотропного материала по теории Н.И. Карпенко.
2. Разработана методика и программный комплекс NESSPO для расчета железобетонных пологих оболочек прямоугольных в плане с несовершенствами формы при разных контурных условиях под действием вертикальной нагрузки в общем случае анизотропии и сложного напряженного состояния.
3. Выполнена апробация программного комплекса на моделях пологих оболочек разной подъемистости и контурных условий в геометрически линейной и нелинейной постановках.
4. Определены нагрузки начала пластических деформаций и трещинообразования для оболочек разной подъемистости контурных условий и класса бетона. Анализ показал плохую точность при расчете шарнирно закрепленных оболочек в геометрически линейной постановке.

Литература

1. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами. – М.: Стройиздат, 1976. – 208 с.
2. Олифер В.И. Расчет покрытий в виде пологих оболочек двойкой кривизны с учетом геометрической и физической нелинейности // Автореф. дис... канд. техн. наук. – Одесса, 1981. – 23 с.
3. Дорофеев В.С., Коломийчук Г.П. Учет влияния специфических свойств железобетона при расчете пологих оболочек. – Вестник ОГАСА № 17. – Одесса: Внешнепресервис, 2005. – С.70-76.
4. Кантор Б.Я. Нелинейные задачи теории неоднородных пологих оболочек. – К.: Наукова думка, 1971. – 136 с.
5. Руководство по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий. – М.: Стройиздат, 1979. – 421 с.