

УДК 622.834:622.268

О ВЛИЯНИИ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Дрибан В. А., Хламов Д. М.
(УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

Методом чисельного моделювання досліджувалося порушення контура гірничої виробки в результаті утворення і розвитку клина вдавлювання. Встановлено критерій втрати стійкості виробки, що полягає в різкому зростанні пластичної складової деформації при досягненні клином певного розміру.

By using numerical simulation method entry contour distortion as a result of pressing wedge formation and development was examined. Entry collapse criterion was determined which involves sharp increasing of deformation plastic component when the wedge achieves specific size.

Существуют различные методы повышения устойчивости протяженных горных выработок [1, 2], среди которых лишь региональные уже получили научно обоснованные методики их применения. В то время как в основу применения локальных и конструктивных методов положены главным образом эмпирические закономерности, полученные в узких диапазонах горно-геологических условий. Попытки же экстраполировать эти закономерности за пределы исходного диапазона, далеко не всегда приносят удовлетворительные результаты. Следствием чего, часто оказывается слабая эффективность методов данной группы [3, 4], при применении их в условиях заметно отличающихся от тех, для которых была разработана расчетная методика. Это, в свою очередь, приводит к невозможности безремонтного поддержания горных выработок.

Для обоснованного вибору локальних і конструктивних методів підвищення устійливості виработок і ефективного їх застосування необхідно знати закономірності трансформації напружено-деформованого стану (НДС) породного масива безпосередньо навколо горної виработки. Як показано в роботах [5, 6], в процесі деформування масива в безпосередній близькості від контура виработки навіть в однорідній ізотропній середі можуть виникати значительні возмущення полів деформацій. Проявляються вони в формі відносно невеликих за розмірами областей концентрації деформацій, які призводять до нерівномірних зміщень порід в різних місцях на контурі виработки. На практиці, подібні нерівномірності зміщень порід часто обумовлюють порушення контура горної виработки в формі клиновидного вдавлювання (клина вдавлювання). Зміщення можуть досягати величин 500 мм і більше, що в свою чергу призводить до значительних поперечних деформацій і руйнувань окремих елементів рам основної крепи, а також їх замків. В методических вказаннях [1] таке стан виработки характеризується як дуже неустійливе, що призводить до швидкого її руйнування, так як конструктивна податливість рам при даній схемі навантаження як правило не працює. Вивчення особливостей поведінки породного масива в місцях проявлення вказаних аномалій необхідно для розробки способів впливу на масив, змінюючих його НДС або властивості таким чином, щоб запобігти формуванню і розвитку клина вдавлювання.

Необхідно зауважити, що на сьогоднішній день не існує безпосередніх методів вимірювання напружень в породних шарах оточуючих виработку. Їх визначають через піддаючіся вимірюванням зміщення порід на контурі виработки або на певній відстані від контура (метод глибоких реперів). Однак методи визначення НДС масива, засновані на вимірюванні зміщень порід, незважаючи на свої достоїнства (вимірювання виробляються безпосередньо в горних виробках), дуже трудомісткі і дають надійну інформацію тільки в певних точках (сеченнях) виработки. В будь-якому випадку відновлення полів напружень за даними зміщень контура

выработки требует использования обоснованных моделей вмещающей среды, устанавливающих связи между напряжениями и деформациями. Существует множество таких моделей. Но, как правило, в рамках этих моделей получены аналитические решения лишь для самых простых случаев, например: круглая выработка в упругой, однородной, изотропной среде. С усложнением задачи (упруго-пластический материал, слоистый массив, геометрически сложный контур полости), аналитические решения либо в принципе не удается получить, либо они становятся чрезмерно сложными и громоздкими, практическое применение которых весьма затруднено. С развитием компьютерной техники, частичное решение данной проблемы было найдено в применении численных методов моделирования, которые выгодно отличаются от выше перечисленных относительно малой трудоемкостью и, практически неограниченным, выбором условий и геомеханических ситуаций для расчетов. Среди последних хорошо зарекомендовал себя метод конечных элементов (МКЭ) и различные программы, реализующие расчеты этим методом [7-9], что и определило выбор инструмента исследования.

В качестве объекта исследования выбрана одиночная горная выработка круглого сечения в однородном изотропном массиве.

Модельные задачи решались в двухмерной упругопластической постановке. В качестве модели поведения материала принято приближение Друкера-Прагера к закону Кулона-Мора. Все модели имеют вид плоского разреза участка горного массива размером 100×100 м с круглой выработкой (радиусом $R = 1$ м) в центре. Для выработки создавались условия гидростатического сжатия, соответствующие глубине 1000 м. Это достигалось приложением распределенной нагрузки (25 МПа) к верхней и правой сторонам квадрата. Для левой и нижней сторон задавались граничные условия в виде запрета нормальных перемещений.

Как было отмечено выше, даже в однородной изотропной среде в результате появления полости могут возникать значительные неоднородности в НДС горного массива, что приводит к неравномерным смещениям пород по контуру выработки. Следует отметить, что на данном этапе нас интересует не причина появления аномалии, а поведение горного массива и изменение па-

раметров его НДС в районе аномалии. Эта задача решалась путем создания исходного нарушения контура выработки в виде симметричного, относительно осевого радиуса, клина вдавливания. В работе [6], приводятся две схемы подобных нарушений: «жесткой» потери устойчивости с углами вдавливания $90 - 100^\circ$ и «мягкой» потери устойчивости с углами вдавливания $140 - 150^\circ$. Для исследования всего диапазона возможных геомеханических ситуаций был проведен расчет семи серий моделей, в которых углы изменялись в указанном диапазоне с шагом 10° . В каждой серии радиальная высота клина изменялась от $0,01$ до $0,25-0,32 R$ (где R – радиус выработки) в различных сериях, с шагом $0,01 R$. Всего было рассчитано 190 моделей, включая две базовые – без нарушения контура выработки и модель без выработки.

Во всех моделях задавались следующие свойства материала массива: модуль упругости (Юнга) $E = 10$ ГПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; сцепление $C = 7$ МПа; угол внутреннего трения $\varphi = 20^\circ$; угол пластического течения $\psi = 20^\circ$. Последние три параметра соответствуют пределу прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж} = 20$ МПа.

Свойства слоев реальных горных пород ни когда не бывают абсолютно однородными. Поэтому для расчетов и прогноза поведения массива используют, как правило, некоторым образом усредненные значения свойств пород, в частности прочностных характеристик. При этом в отдельных точках значения прочности породного слоя по тем или иным причинам могут оказаться значительно ниже, принятых к расчетам. Именно в таких точках могут возникать аномалии, приводящие к нарушению контура выработки с образованием клина вдавливания и потерей устойчивости горной выработки с невозможностью ее дальнейшей эксплуатации. Проведенное исследование позволяет уточнить процесс образования и развития клина вдавливания на контуре горной выработки, начало которому было положено в работах [5 и 6].

Наиболее общими показателями, характеризующими НДС массива при моделировании, являются интенсивность напряжений и интенсивность механических деформаций определяемых по формулам (1):

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{инт}} &= \text{MAX}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|), \\ \varepsilon_{\text{инт}} &= \text{MAX}(|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|, |\varepsilon_2 - \varepsilon_3|, |\varepsilon_3 - \varepsilon_1|),\end{aligned}\tag{1}$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения;
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации.

На начальной стадии в непосредственной близости от контура выработки образуется незначительная по площади область, характеризующаяся повышенным уровнем интенсивности деформаций (рис. 1). Как видно из рисунков 1 и 2 поля интенсивности деформаций и пластической их составляющей практически полностью идентичны. Это говорит о том, что деформации в основном обусловлены пластической составляющей (рис. 2). Упругая составляющая деформаций весьма незначительна (рис. 3), существенного влияния на процесс не оказывает, и в дальнейшем анализироваться не будет. Максимум деформаций расположен в центре области.

Рассмотрим главные компоненты деформаций. 2-я главная деформация (соответствует горизонтальному направлению) принимает в ядре аномалии максимальные положительные значения, что говорит о концентрации деформаций растяжения (рис. 4). 3-я главная деформация (соответствует вертикальному направлению) в центре аномалии достигает максимального отрицательного значения, что свидетельствует о концентрации деформаций сжатия (рис. 5). Таким образом, получаем в одной точке массива максимумы деформаций сжатия и растяжения во взаимно перпендикулярных направлениях. Причем растяжение направлено по касательной к контуру выработки, а сжатие имеет радиальное направление. Если учесть, что предел прочности горных пород на одноосное растяжение приблизительно на порядок меньше, чем предел прочности на одноосное сжатие, то описанные условия будут способствовать образованию радиальной трещины в массиве в непосредственной близости от контура горной выработки. Особенно в слабых породах, которые часто встречаются в непосредственной кровле и почве угольных пластов. В дальнейшем эта трещина становится осью клина вдавливания.

С появлением первичного клина вдавливания, на контуре выработки вблизи углов основания клина также формируются не-

большие области повышенных деформаций, имеющих те же особенности поля деформаций, что и ядро аномалии (рис. 1-5), при этом в теле клина, практически по всей площади разреза значения деформаций близки к нулю. Но уже при радиальной высоте клина $0,02-0,03 R$ максимумы поля деформаций и его компонент смещаются в эти области, что делает их весьма неустойчивыми и способствует развитию процесса. С дальнейшим увеличением размеров клина, концентрация деформаций в ядре аномалии постепенно уменьшается в сравнении деформациями в его основании, также ядро аномалии смещается вглубь массива (рис. 6). Это позволяет утверждать, что процесс деформирования пород развивается одновременно в двух противоположных направлениях в сторону выработки и вглубь массива, а также, что области в основании клина вдавливания в развитии процесса смещений пород играют более значительную роль, чем область в ядре первичной аномалии.

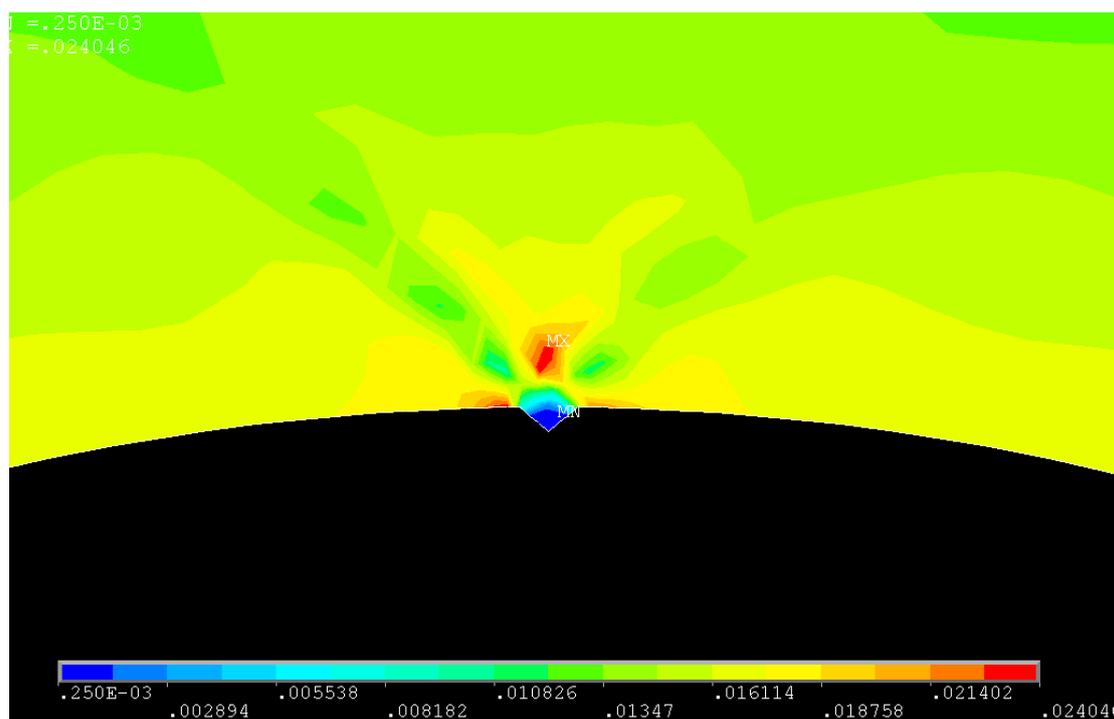


Рис. 1. Интенсивность деформаций (модель с углом вдавливания 100° и радиальной высотой $0,01 R$)

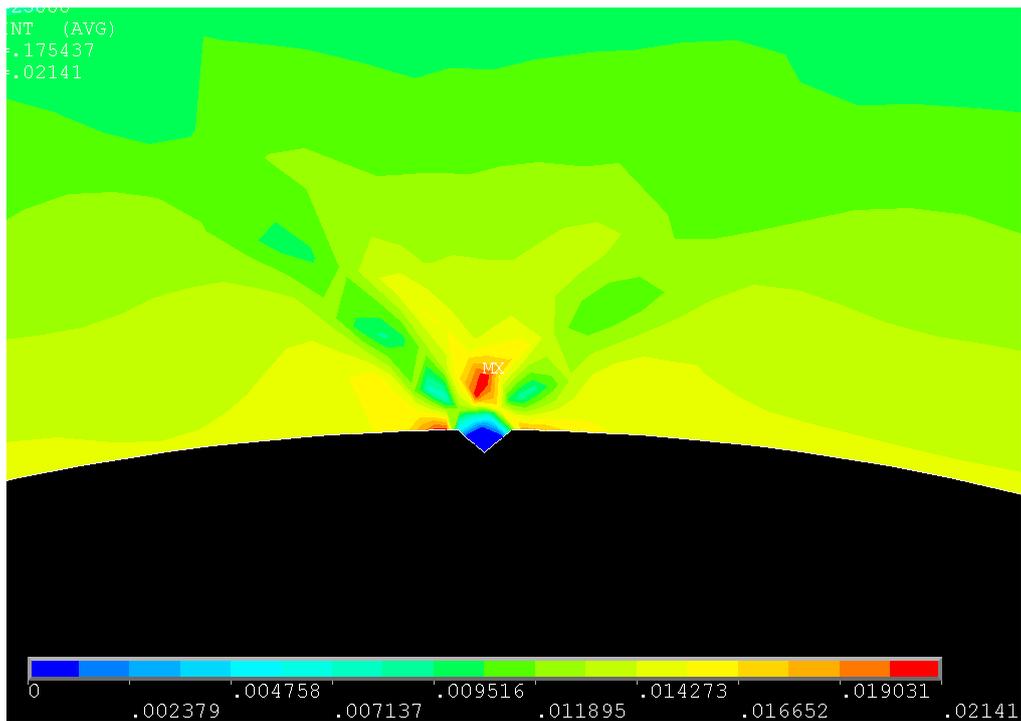


Рис. 2. Интенсивность пластических деформаций (модель с углом вдавливания 100° и радиальной высотой $0,01 R$)

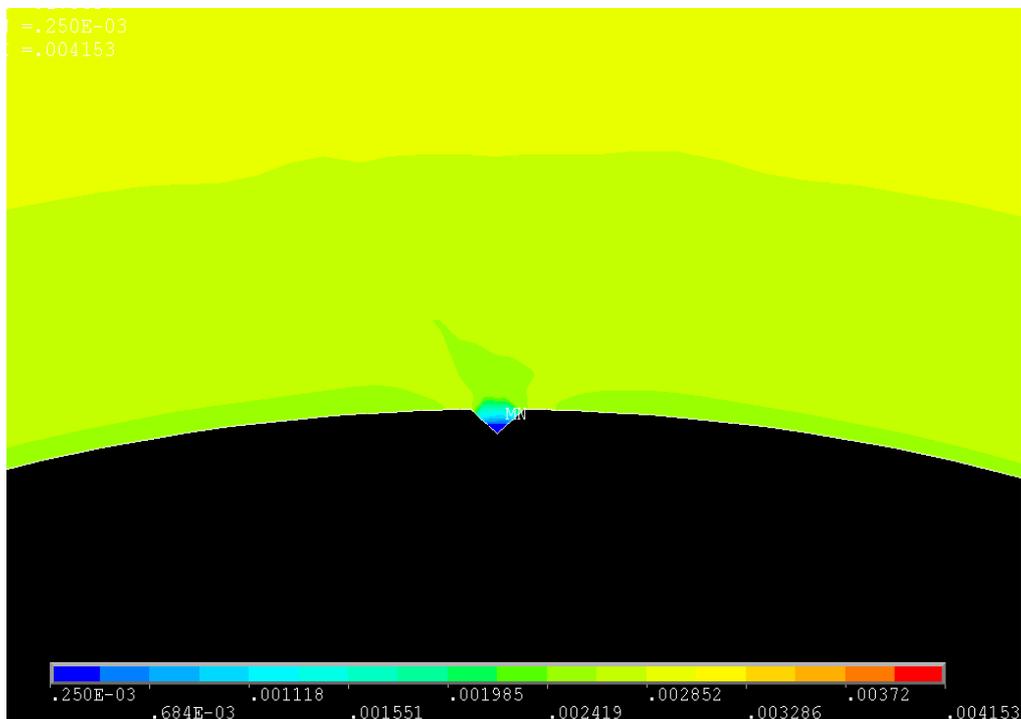


Рис. 3. Интенсивность упругих деформаций (модель с углом вдавливания 100° и радиальной высотой $0,01 R$)

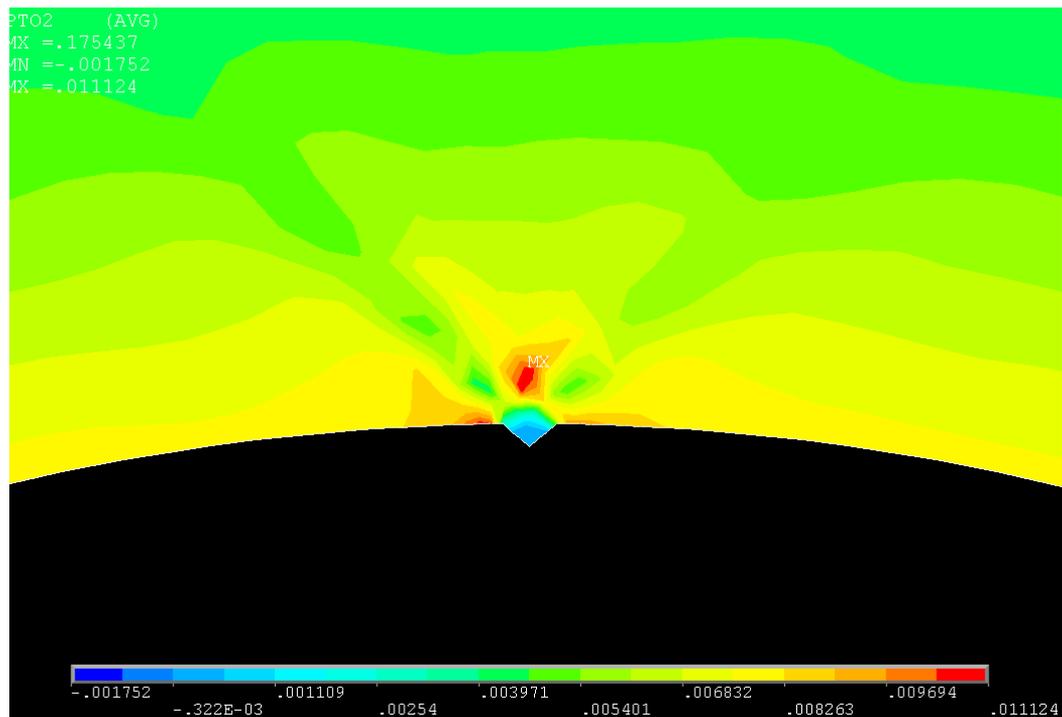


Рис. 4. 2-я главная деформация (модель с углом вдавливания 100° и радиальной высотой $0,01 R$)

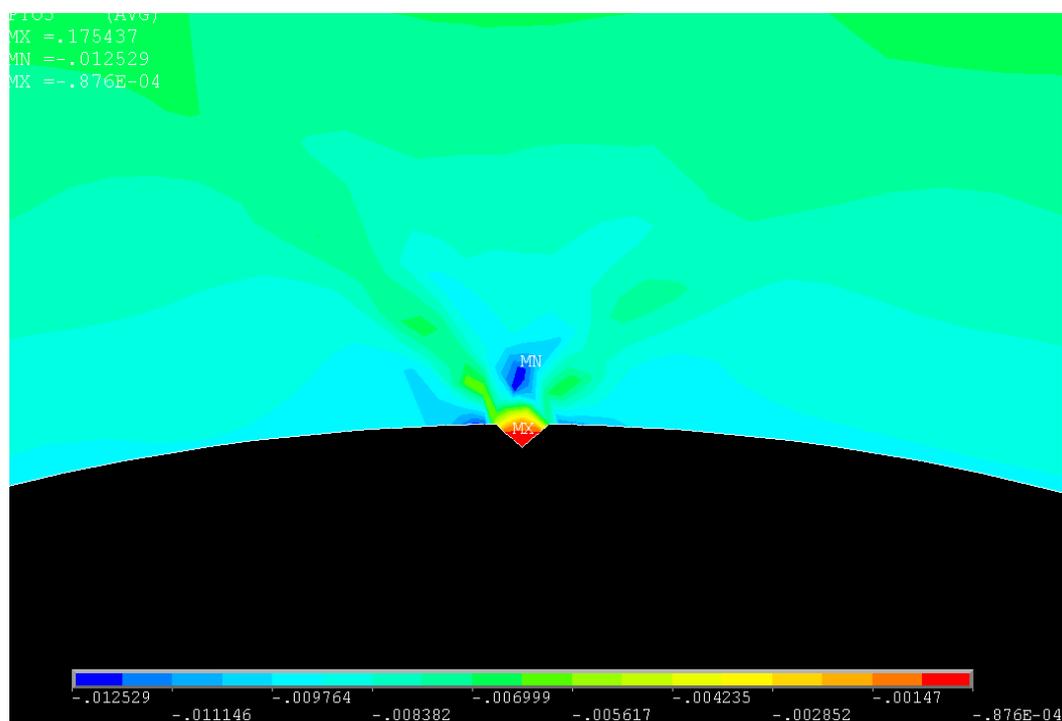


Рис. 5. 3-я главная деформация (модель с углом вдавливания 100° и радиальной высотой $0,01 R$)

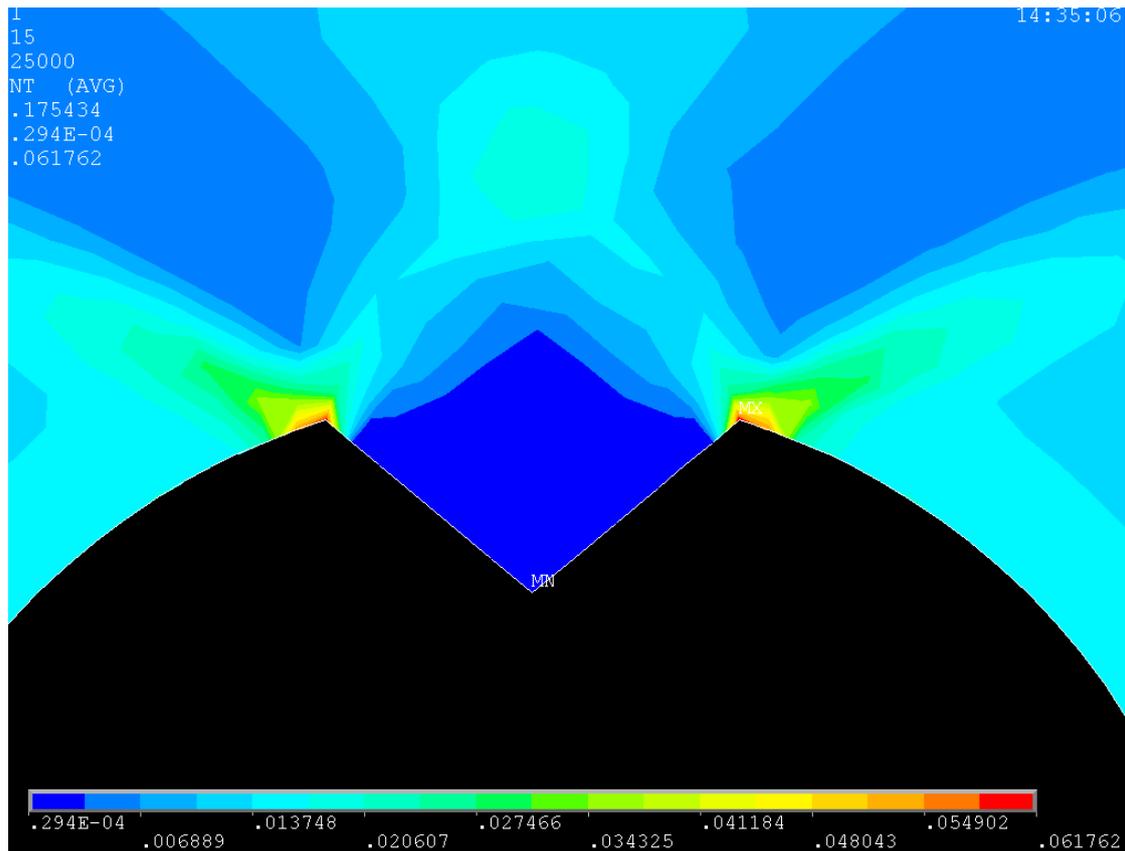


Рис. 6. Интенсивность деформаций (модель с углом вдавливания 100° и радиальной высотой $0,29 R$)

Как правило, поперечные деформации рам основной крепи являются следствием образования на контуре горной выработки клина вдавливания, принципиальный механизм формирования и развития которого был рассмотрен выше. Теперь подробно рассмотрим алгоритм развития процесса.

На практике в большинстве случаев за критерии устойчивости выработок принимают исключительно технологические критерии, т.е. соблюдение условий безопасной эксплуатации оборудования, размеры технологических зазоров и т.д. с учетом прогнозируемой осадки основной крепи после ее установки. При этом предполагается равномерная осадка крепи за счет ее конструктивной податливости. Однако нередко, особенно в выработках, попадающих в зону влияния очистных работ, наблюдаются значительные непрогнозируемые поперечные деформации отдельных элементов и целых рам основной крепи. При этом выработку продолжают эксплуатировать пока это возможно, в лучшем

случае, усиливая крепь, что далеко не всегда дает необходимый эффект. Это в свою очередь, в конце концов, приводит к необходимости экстренного перекрепления выработки, с соответствующими материальными и финансовыми затратами, не считая того что перекрепление может мешать другим технологическим процессам участка. Предсказывать появление таких деформаций, а также выработать эффективные меры противодействия можно только поняв причину данного явления и разобравшись в алгоритме его развития с точки зрения геомеханики.

Как уже говорилось, при радиальной высоте клина $0,02-0,03 R$ максимумы поля деформаций и его компонент смещаются в области контура выработки, непосредственно прилегающие к основанию клина. Компоненты деформаций имеют тот же характер что и в ядре аномалии, а именно в направлении касательной к контуру выработки имеют место положительные, т.е. деформации растяжения, в радиальном направлении – отрицательные, т.е. деформации сжатия. В данном случае ситуация усугубляется еще и наличием свободной поверхности, что обуславливает не только образование радиальных трещин, но и способствует интенсивным смещениям пород внутрь контура выработки.

Исходя из вышеизложенного, целесообразно отследить закономерность изменения ситуации при увеличении радиальной высоты клина, приняв за основной параметр оценки максимальные значения интенсивности деформаций, пластической составляющей и их компонент.

Как видно из рисунков 7-9 все графики имеют четко выраженный восходящий тренд при незначительных колебаниях, которые объясняются ограниченной точностью расчета. Т.е. в общем случае, с увеличением радиальной высоты клина возрастают и максимальные значения деформаций. Второй особенностью всех графиков является относительно малый пошаговый прирост деформаций до определенной точки, в которой происходит их резкий (в сравнении с предыдущим) рост на протяжении одного-двух шагов. На практике такое резкое увеличение деформаций приведет к столь же резкому росту смещений на контуре выработки, что с точки зрения геомеханики можно считать моментом потери выработкой устойчивости. Таким образом, можно сфор-

мулировать критерий потери устойчивости выработки – момент потери устойчивости горной выработкой наступает при резком росте пластической составляющей деформаций в областях сопряжения клина с исходным контуром выработки, при достижении клином определенного размера (радиальной высоты).

На разных графиках момент потери устойчивости происходит в разных точках: $90^\circ - 0,28R$; $100^\circ - 0,26R$; $110^\circ - 0,24R$; $120^\circ - 0,22R$; $130^\circ - 0,19R$; $140^\circ - 0,17R$; $150^\circ - 0,14R$ (рис. 10).

Приведенные значения демонстрируют четкую закономерность – с увеличением угла вдавливания потеря устойчивости выработки происходит при меньшей радиальной высоте клина. В работе [5] аналитическим путем было установлено, что потеря устойчивости выработки наступает при радиальной высоте клина $0,12 - 0,18R$ при различных геомеханических условиях. Для угла внутреннего трения 20° была получена величина $0,149R$, что на графике рисунка 10 относится к участку с углами вдавливания $140 - 150^\circ$, а также соответствует условиям схемы «мягкой» потери устойчивости, описанной в работе [6].

Выводы

Таким образом, проведенные модельные исследования напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг горной выработки позволили получить следующие результаты.

1. Уточнен и описан механизм нарушения контура горной выработки в результате процесса образования и развития клина вдавливания.

2. Установлен критерий потери устойчивости выработки, заключающийся в резком росте пластической составляющей деформаций в областях сопряжения клина с исходным контуром выработки, при достижении клином определенного размера (радиальной высоты).

3. Установлена новая закономерность, заключающаяся в том, что с увеличением угла вдавливания потеря устойчивости горной выработки происходит при меньшей радиальной высоте клина.

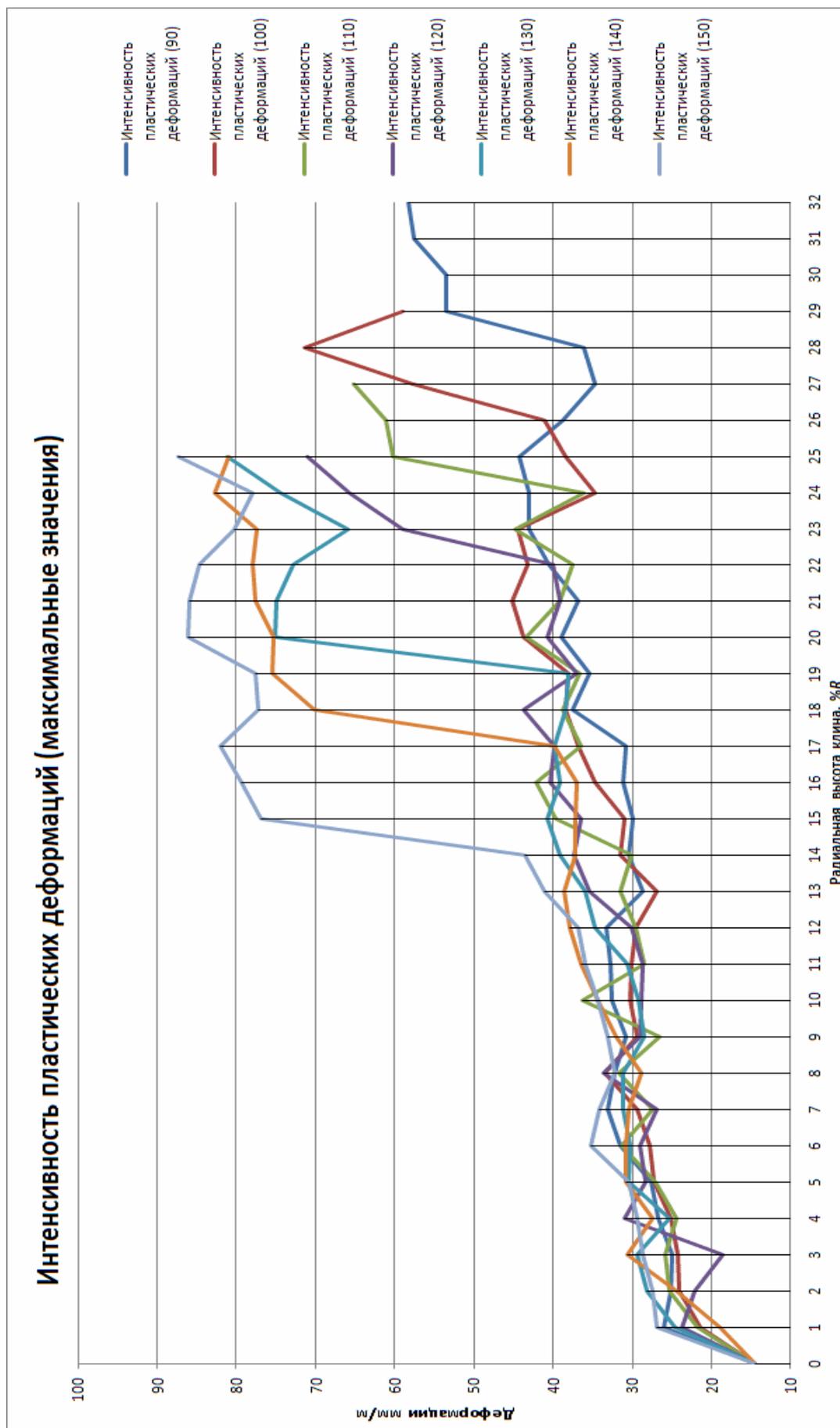


Рис. 7. Графики максимальных значений интенсивности пластических деформаций

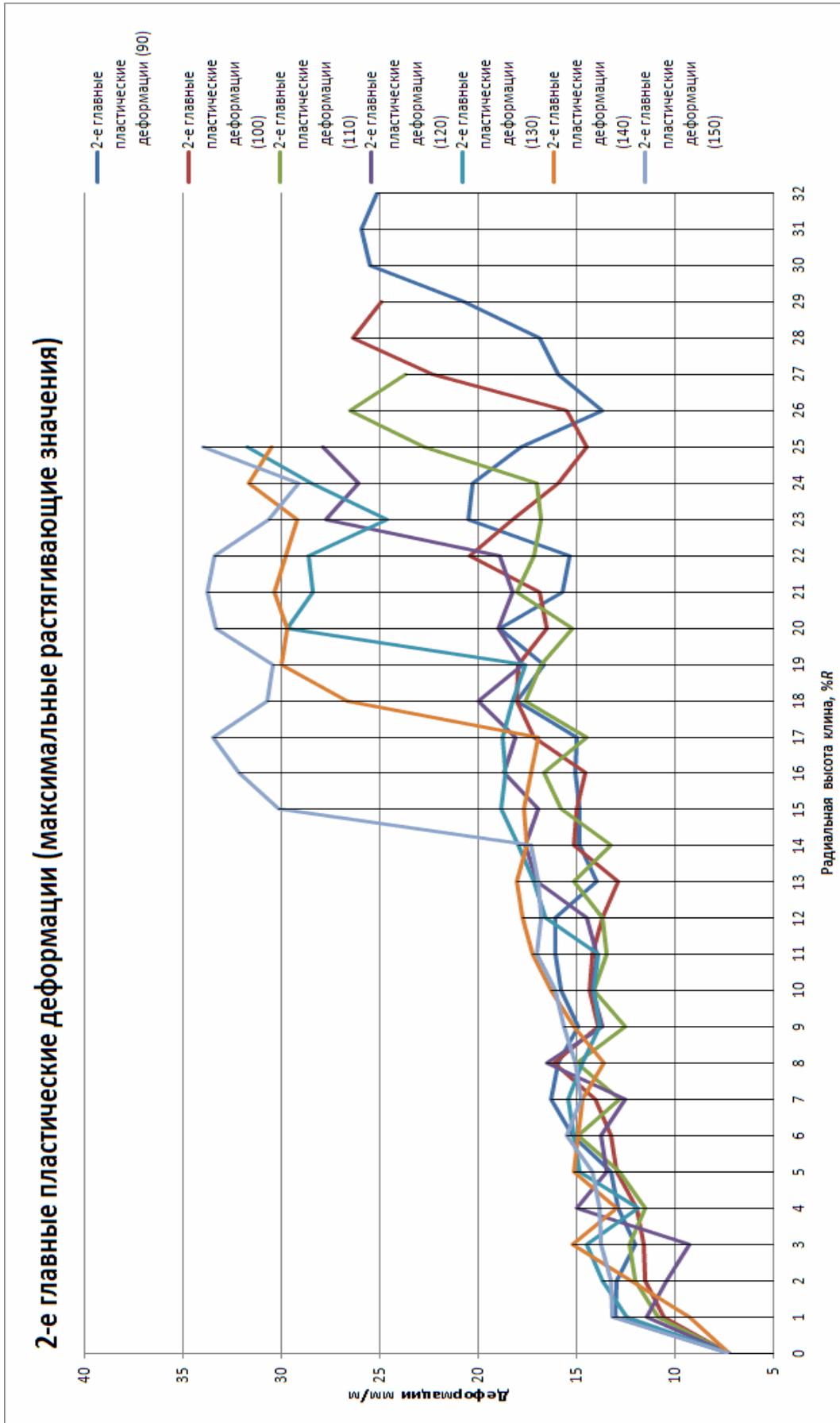


Рис. 8. Графики максимальных значений 2-х главных пластических деформаций

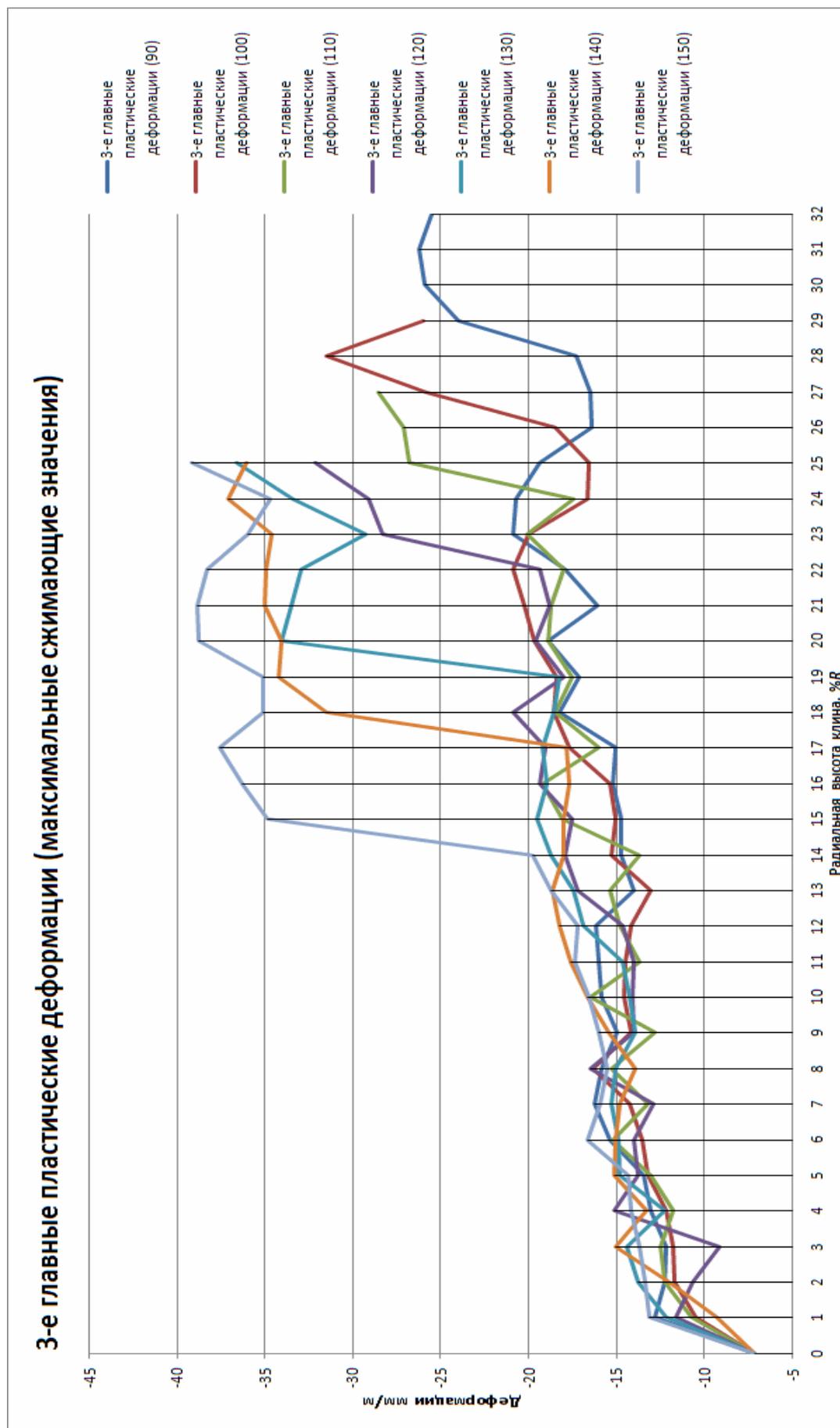


Рис. 9. Графики максимальных значений 3-х главных пластических деформаций



Рис. 10. Зависимость условий потери устойчивости выработки от величины угла вдавливания

Следует подчеркнуть, что все эти результаты получены при конкретных значениях геомеханических параметров. Представляется перспективным провести анализ полученных результатов по параметрам площадей потери выработкой сечения и дополнительных смещений, полученных непосредственно в процессе расчета моделей.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Методические указания: КД 12.01.01.201-98. – Утв. Минуглепром Украины 25.06.98. – Донецк: УкрНИМИ, 1998. – 154 с.
2. Система обеспечения надежного и безопасного функционирования горных выработок с анкерным креплением. Общие технические требования: СОУ 10.1.05411357.010.– Введ. 2008-01-12. – К.: Минуглепром Украины, 2008 – 83 с.
3. Анализ проявлений горного давления при проведении протяженных выработок в районе мелкоамплитудных геологических нарушений (на примере уклона блока № 10 ш/у «Покров-

- ское») / Сдвижкова Е. А., Кравченко К. В., Халимендик А. В. и др // Наукові праці УкрНДМІ – 2010. – №9. – Ч1. – С. 269 – 281.
4. Дрибан В. А. О деформировании массива, вмещающего выработки с комбинированной рамно-анкерной крепью / Дрибан В. А., Новиков А. О., Шестоपालов И. Н. // Наукові праці УкрНДМІ – 2012. – №12. – С. 228 – 254.
 5. Дрибан В. А. Об одном подходе к оценке устойчивости массива горных пород вокруг выработок / В. А. Дрибан // Наукові праці УкрНДМІ – 2010. – №7. – С. 211 – 223.
 6. Дрибан В. А. Об одном пути потери устойчивости горной выработки / В. А. Дрибан // Наукові праці УкрНДМІ. – 2011. – №9. – Ч1. – С. 309 – 335.
 7. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике \ Фадеев А. Б. – М.: Недра, 1987. – 222 с.
 8. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах / Басов К. А. – М.: Компьютер пресс, 2002. – 224 с.
 9. Басов К. А. ANSYS. Справочник пользователя / Басов К. А. – М.: ДМК, 2005. – 640 с.