

УДК 622.834

И.В. Назимко (канд. техн. наук)
научн. сотр. УкрНИМИ

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ КРОВЛИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА

Выполнено компьютерное моделирование сдвижений и деформаций непосредственной кровли при отработке угольного пласта.

Ключевые слова: очистные работы, лава, давление, деформация.

Отработка выемочного участка сопровождается сдвижением массива горных пород. Особенности этого сдвижения является то, что в ограниченном пространстве сочетаются физические процессы обратимых и необратимых деформаций и перемещений участков или блоков горных пород. Наиболее характерным обратимым процессом можно считать упругое сжатие угольного пласта в зоне динамического опорного давления. При удовлетворительном состоянии вмещающих пород и нормальном режиме очистных работ типичным необратимым геомеханическим процессом является отжим краевой части пласта, опускание кровли, поднятие почвы, обрушение кровли, падение обрушившихся кусков с последующим разрыхлением и уплотнением от веса подработанной толщи.

Рис. 1 показывает типичный график деформирования образца горной породы, получаемый на жестком прессе с учетом запредельной ветви деформирования. Участок 1 отражает в основном упругий или обратимый процесс деформирования. Ниспадающий участок 2 характеризует необратимый процесс падения прочности образца горной породы. Почти горизонтальный участок 3 отвечает процессу сопротивления разрушенной породы благодаря остаточной прочности. Если процесс опускания кровли является упругим (позиция 1 на рис. 1), тогда создаются предпосылки для устойчивого и безопасного состояния рабочего пространства очистного забоя. Неупругое деформирование кровли происходит под действием предельных напряжений, когда впереди очистного забоя возникают трещины горного давления, а над рабочей частью очистного забоя заколы и обрушения (вывалы) непосредственной кровли. Эти необратимые процессы создают опасность, травматизм, снижают качество добываемого угля из-за его разубоживания пустой породой от вывалов, величина которого достигает 50-70% и более, содействует повышенному износу добычного оборудования.

Неупругие деформации непосредственной кровли описываются участками 2 и 3 на кривой рис. 1. Эти же участки характеризуют процесс отжима краевой части пласта, разрушения непосредственной почвы от вдавливания оснований секций механизированной крепи, обрушения непосредственной и основной кровли позади режущего ряда крепи, деформирование пород на сопряжении лавы с выемочными выработками. Моделирование и натурное изучение таких физических процессов необратимого

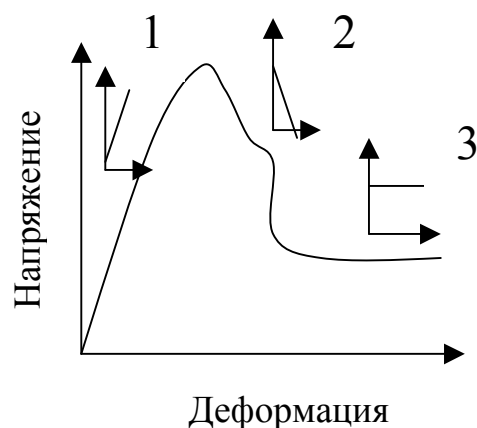


Рис. 1. График необратимых деформаций вмещающих пород

сдвигения вмещающих пород является крайне сложной задачей. На рис. 1 видно, что путь нагружения угля или породы нелинейен, состоит из восходящих 1, нисходящих 2 и горизонтальных 3 участков. В результате суммарные сдвигения и деформации не могут быть найдены с помощью традиционного принципа суперпозиции, что сильно усложняет изучение процесса сдвижений в окрестности очистного забоя, как на моделях, так и в натуральных условиях. По мере развития необратимых сдвижений и деформаций массива, напряжения и нагрузки, порождающие эти деформации на предыдущих этапах этого сложного составного процесса, забываются и их практически невозможно восстановить. Вместе с тем суммарные сдвигения и деформации являются итогом действия сил и напряжений на всех этапах процесса сдвижений. Таким образом, нельзя исследовать процесс необратимых сдвижений в целом, не изучив его отдельные составляющие.

Отсюда вытекает необходимость исследования необратимого процесса сдвижений кровли в окрестности очистного забоя путем разбиения его на элементарные участки, в пределах которых зависимость между напряжениями и деформациями можно с заданной точностью рассматривать как линейную. Так, на участке 1 деформации возрастают пропорционально увеличению напряжений, на участке 2 напряжения линейно убывают с ростом деформаций, а на участке 3 деформации протекают при постоянном напряжении и вызваны другими термодинамическими силами и причинами.

Разбиение необратимого процесса сдвижений на характерные участки должно осуществляться в увязке с порождающими их причинами. Отсюда вытекает идея разделения причин или движущих термодинамических сил, под действием которых развивается и протекает необратимый процесс, на элементарные составляющие, в пределах действия которых связь между напряжениями и деформациями (или между термодинамическими силами и порождающимися потоками) можно считать приближенно линейной. В этом случае процесс необратимых сдвижений и деформаций массива горных пород можно исследовать с помощью простых линейных моделей, а затем общие величины сдвижений и деформаций находить накоплением. При этом история необратимого процесса накапливается в виде упругих и необратимых деформаций, а текущие напряжения будут действовать только в пределах элементарных участков и вне их пределов забываются [1].

По существу это означает переход к исследованию устойчивости работы выемочного участка под воздействием элементарных возмущений или флуктуаций, порождаемых основными процессами очистных работ. В качестве элементарных возмущений в данном случае принимаем элементарные основные процессы, которые сопровождают очистные работы. Для решения задачи обрушения (вывалов) непосредственной кровли в рабочее пространство очистного забоя важны прежде всего два процесса: разрушение угля очистным комбайном и разгрузка секций крепи перед их передвижкой. В качестве элементарного процесса, касающегося управления кровлей, очевидна разгрузка одной секции механизированной крепи, так как меньшая степень разбиения в данном случае невозможна.

В отличие от разгрузки и передвижки секций механизированной крепи процесс разрушения угля очистным комбайном не характеризуется дискретностью. В связи с этим принимаем в качестве элементарного процесса выемки угля путь передвижения очистного комбайна, равный ширине заходки. Анализ результатов шахтных инструментальных наблюдений за сдвижением непосредственной кровли очистного забоя, выполненных ранее, дает основание утверждать следующее. В течение обоих выделенных элементарных процессов очистных работ сдвигения кровли и механические напряжения на контакте с угольным пластом или с секцией крепи связаны линейно,

несмотря на то, что в процессе протекания этих элементарных процессов могут возникать разрушения кровли.

Длительность таких возмущений составляет в зависимости от скорости перемещения очистного комбайна 5-30 секунд (см. табл. 1). Период релаксации напряжений вокруг очистного забоя составляет несколько суток, недель и даже лет. Согласно [2] основным критерием устойчивой работы выемочного участка является прочность вмещающих пород, причем в процессе диссипации энергии горного давления могут возникать пространственные структуры, которые ранее не выделялись и не исследовались.

Таким образом, задачей данного исследования является моделирование изменения (приращения) сдвижений и деформаций непосредственной кровли в течение выполнения двух элементарных процессов очистных работ: разгрузки секции механизированной крепи и выемки угля очистным комбайном на длину, равную ширине заходки. Именно при выполнении этих процессов зарождаются и провоцируются вывалы кровли [3-16].

Методика исследований, исходные данные и граничные условия

В качестве инструмента исследований используется компьютерное моделирование с помощью метода граничных элементов (МГЭ) в постановке процедуры разрывных перемещений. Именно эта версия МГЭ наиболее подходит для расчета напряжений и деформаций в массиве горных пород вокруг очистной выработки при отработке пластового месторождения [17]. Условия проведения эксперимента моделирования следующие. Глубина залегания пласта 1000 м, вынимаемая мощность пласта 1,5 м, угол залегания составляет 5° . Кровля представлена 1 классом категории А1, легкообрушаемая.

Непосредственная кровля имеет незначительную прочность на растяжение, разбита трещинами горного давления и склонна к обрушению в рабочее пространство очистного забоя. Непосредственная почва пласта устойчива, не склонна к разрушению под основанием секций механизированных крепей при работе очистного забоя. Модуль деформации вмещающих пород 1 ГПа, коэффициент Пуассона 0,25. Модуль деформации угольного пласта 0,2 ГПа, коэффициент Пуассона 0,3. Скорость продвижения очистного забоя составляет примерно 100 м/мес.

Рабочее сопротивление секций очистной крепи 450 кН. Все секции, которые находятся под нагрузкой, оказывают сопротивление, близкое к рабочему, определяемому настройкой обратных клапанов. Ширина заходки и ширина секции механизированной крепи принята равной 1 м, что удобно для сопоставления эффекта элементарной (или единичной) выемки угля и разгрузки крепи. Кроме этого принятые размеры заходки и ширины секции крепи удобны для того, чтобы нормировать результаты исследований для других не сильно отличающихся исходных данных. Длина секции принята равной 4,5 м. Указанные параметры близки к современным механизированным крепям, применяемым при ведении очистных работ в производительных лавах угольных шахт Украины.

Следует отдельно оговориться о том, что в данной задаче моделировалась только непосредственная кровля пласта. Дело в том, что учет действия основной кровли и тем более вышележащих слоев пород в данной задаче не имеет смысла. Элементарная выемка пласта и разгрузка одной секции механизированной крепи никак не скажется на напряженном состоянии такой большой геомеханической системы. Другое дело непосредственная кровля, мощность которой соизмерима с длиной и шириной элементарной выемки и шириной и длиной секции механизиро-

ванной крепи. Указанные элементарные процессы очистных работ оказывают максимальное и весьма существенное возмущение на напряженное состояние именно непосредственной кровли.

Расчетная схема приведена на рис. 2.

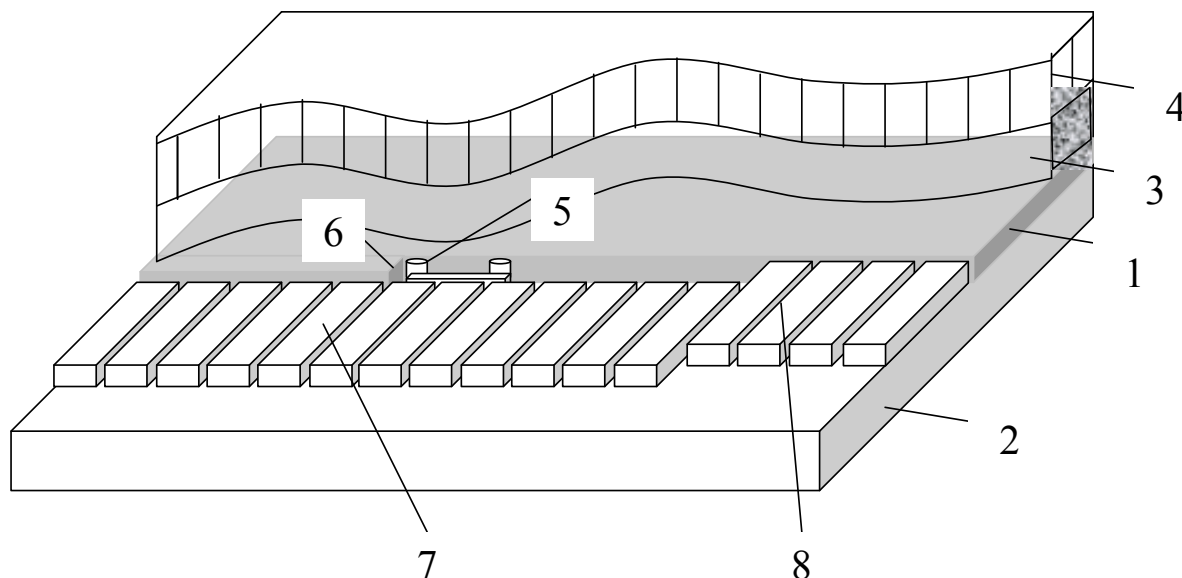


Рис. 2. Расчетная схема

Угольный пласт 1 покоится на основании 2, состоящем из непосредственной и основной почвы. Непосредственная кровля 3 пласта 1 имеет мощность 2 м и пригнужена весом вышележащих пород 4. Очистной комбайн 5 вынимает заходку 6 в виде торцевого забоя, который перпендикулярен лаве. Секции механизированной крепи 7 придвинуты к очистному забою на левом участке расчетной схемы и отстают от него на среднем участке фрагмента очистного забоя, где комбайн произвел выемку угля. Группа секций 8 показана в положении после передвижки и распора. Передвижка производится на расстоянии 10 м от места выемки угля очистным комбайном. Несмотря на пренебрежимо малый угол наклона пласта, будем для удобства считать, что очистной комбайн перемещается сверху вниз, а лава движется по простиранию.

Результаты исследования напряжений и оседаний, нормальных к напластованию

На рис. 3 показано распределение горного давления в окрестности места выполнения элементарных процессов очистных работ. Стрелкой, ориентированной на рисунке влево или в сторону падения, показано направление движения очистного комбайна вдоль лавы, а светлой стрелкой (вверх на рисунке или по простиранию) указано направление движения лавы. Пунктирными линиями обозначены контуры линии очистного забоя и групп секций механизированной крепи соответственно расчетной схеме на рис. 2.

Видно, что впереди очистного забоя вдоль его изломанной линии наблюдается опорное давление, концентрация которого в угловой части торцевого забоя 1 равна 5,05. Впереди очистного забоя 2 напротив незакрепленного участка кровли

концентрация опорного давления меньше и составляет 3,47. Там, где секции механизированной крепи пододвинуты к забою 3, (а их сопротивление по условию близко к уровню рабочего сопротивления), концентрация опорного давления несколько меньше и составляет только 3,25.

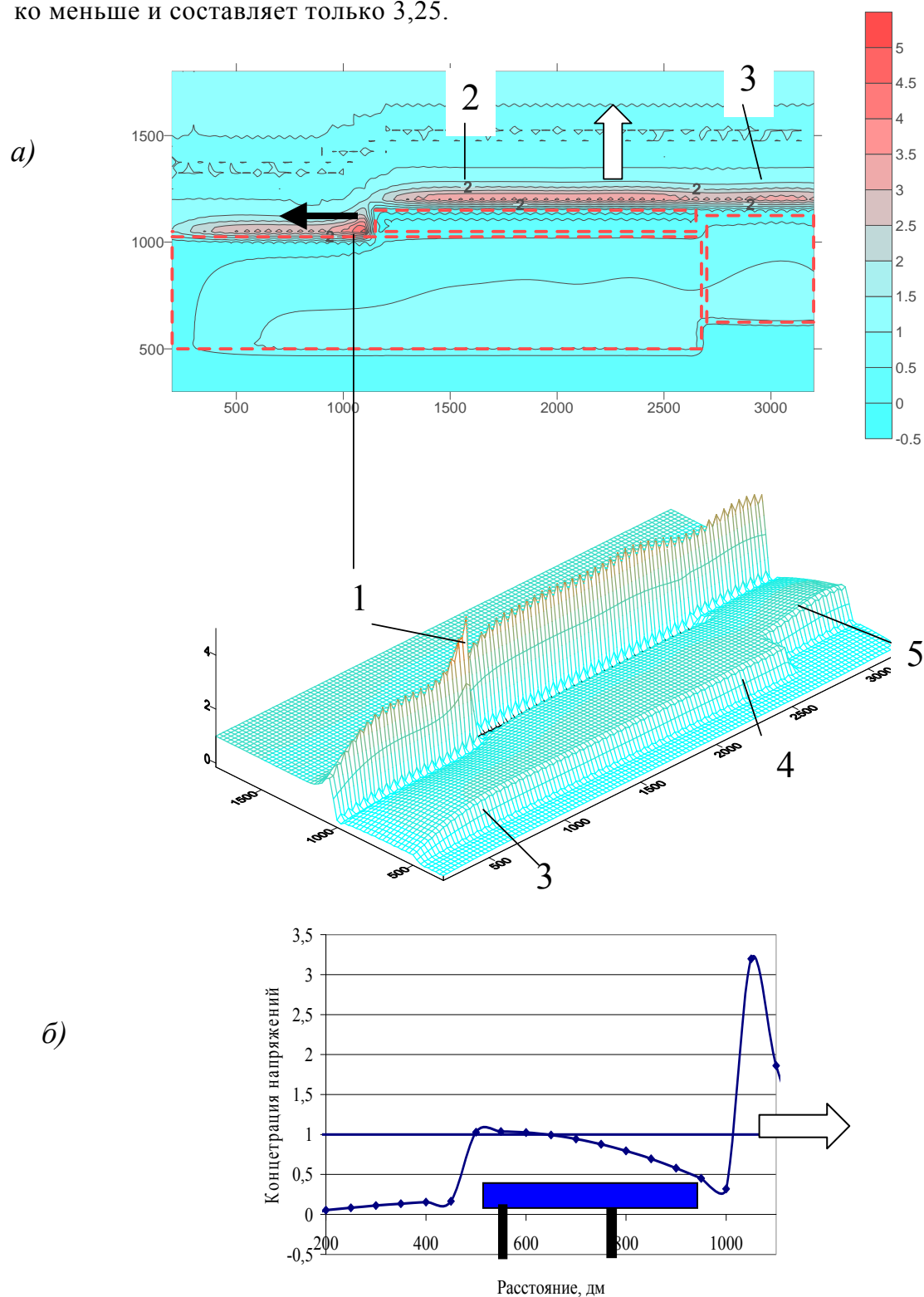


Рис. 3. Распределение концентрации вертикальной компоненты горного давления в месте работы очистного комбайна (а) и давления пород кровли на секцию механизированной крепи (б)

Такой характер распределения опорного давления хорошо согласуется с общими закономерностями проявления горного давления в окрестности действующего очистного забоя. Максимум опорного давления действительно наблюдается на выступающей угловой части пласта в месте заходки. Именно в этом месте инициируется отжим краевой части пласта, который в последствии развивается после прохода комбайна, однако уже с меньшей интенсивностью. Это происходит, во-первых, из-за уменьшения концентрации опорного давления в $5,05/3,47=1,45$ раза. Во-вторых, уменьшение интенсивности отжима обусловлено изменением напряженного состояния краевой части угольного пласта, которое в данном месте ближе к плоскому напряженному, тогда как на угловой части 1 оно ближе к одноосному сжатию. Известно, что при плоском напряженном состоянии массив имеет меньше степеней свободы для деформирования, чем при одноосном. Некоторое снижение концентрации опорного давления на участке 3 объясняется тем, что группа секций крепи (обозначены позицией 8 на рис. 2) снимает небольшую долю нагрузки с краевой части пласта 3.

В данном случае наблюдается снижение концентрации опорного давления на $(3,47-3,25)/3,47*100=6,3\%$, что вполне согласуется с практикой. Дело в том, что сопротивление механизированной крепи несоизмеримо меньше опорного давления, обусловленного весом вышележащих пород. Именно поэтому влияние секций механизированной крепи на опорное давление, действующее на кромке угольного пласта, незначительно. Однако даже такая величина возмущения в виде снятия напряжений на кромке угольного пласта имеет большое значение для повышения устойчивости очистного забоя и непосредственной кровли в целом.

Секции механизированной крепи по указанным соображениям концентрируют гораздо меньшее горное давление. При этом величина нагрузки на перекрытие секции уменьшается от задней части (над режущим или посадочным рядом стоек) к козырьку перекрытия. Величина концентрации нагрузки на перекрытие секции крепи имеет треугольную эпюру, что видно на фрагменте (б) рис. 3. Здесь вид на секцию дан со стороны восстания и поэтому забой движется вправо, что указано полрой стрелкой. Такой характер распределения нагрузки на перекрытие секции многостоечной механизированной крепи хорошо подтверждается натурными экспериментами и результатами моделирования других авторов [3, 4].

Таким образом, анализ распределения горного давления и нагрузки на секции механизированной крепи свидетельствует о достоверности результатов моделирования, что позволяет использовать их для дальнейшего анализа при изучении компонент напряженного состояния массива в окрестности выполнения элементарных процессов очистных работ.

На рис. 4 показано распределение возмущения напряженного состояния массива горных пород элементарной или единичной выемкой пласта. Снимаемые напряжения показаны в виде положительных величин, пригрузка в виде отрицательных. С непосредственной кровли снимается весьма значительная нагрузка величиной до 4,92 от геостатического уровня на участке 1, представленном угловой выступающей частью угольного пласта. Это естественно, поскольку именно угловой участок, который был впоследствии разрушен исполнительным органом очистного комбайна, изначально нес на себе нагрузку, концентрация которой равнялась 5,02. Площадь, на которой была снята нагрузка, составляет примерно 1 м^2 , и по сути представлена площадью пласта в пределах элементарной или единичной выемки.

В результате снятия нагрузки с элементарной выемки, нагрузка перераспределилась на окружающую область непосредственной кровли и составила впереди элементарной выемки 1,44 (участок 2) и сбоку 1,0 (участок 3). Была также пригру-

жена кровля в пределах обнажения, где она подпиралась секциями механизированной крепи. Эта зона очерчена линией 4, а величина пригрузки в ее пределах составила от 0,19 до 0,01. Главным образом эту пригрузку приняли на себя секции механизированной крепи. Размер зоны существенной пригрузки крепей составляет 3 м впереди шнека работающего комбайна и 8 м позади него. Размеры общей зоны влияния выемки составляют 8,5 м впереди комбайна и 16 м позади. Согласно работам Орлова А.А. с сотрудниками, длина общей зоны влияния комбайна на секции механизированной крепи впереди изменяется в пределах 5-28 м, составляя в среднем 14 м, а позади 8-40 м, в среднем 27 м.

Отметим, что в натуральных условиях определяли общие размеры зоны влияния комбайна, которые будут больше влияния элементарной или единичной выемки. Это лишний раз свидетельствует о достоверности полученных на модели результатов.

Преимуществом выбранного подхода к математическому моделированию напряженно-деформированного состояния массива вокруг очистного забоя в виде исследования реакции на элементарное возмущение является возможность получить и исследовать параметры напряженно-деформированного состояния массива горных пород в любой его точке. Это принципиально невозможно в шахтных условиях из-за помех при работе комбайна или отсутствия доступа внутрь массива или к месту контакта кровли с перекрытиями секций механизированных крепей. Рис. 5 наглядно иллюстрирует это преимущество, показывая распределение оседания кровли в окрестности единичной выемки по всей площади кровли.

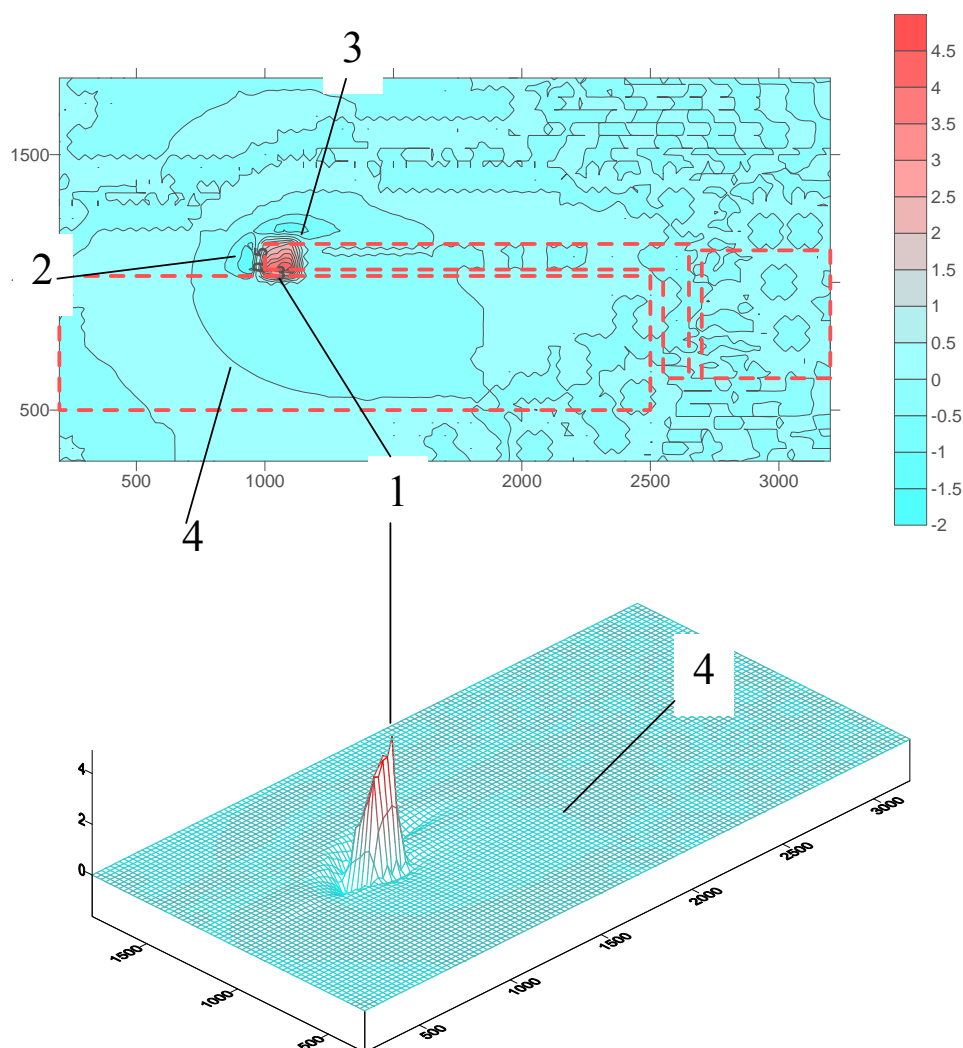


Рис. 4. Возмущение напряженного состояния горного массива от единичной выемки

дания действительно будут максимальны по линии посадочного ряда секций механизированной крепи. Другими словами влияние снятия заходки на длине $27+14=41$ м будет не только количественно, но и качественно отличаться от влияния заходки на длине 1 м. Покажем это с помощью графиков на рис. 6.

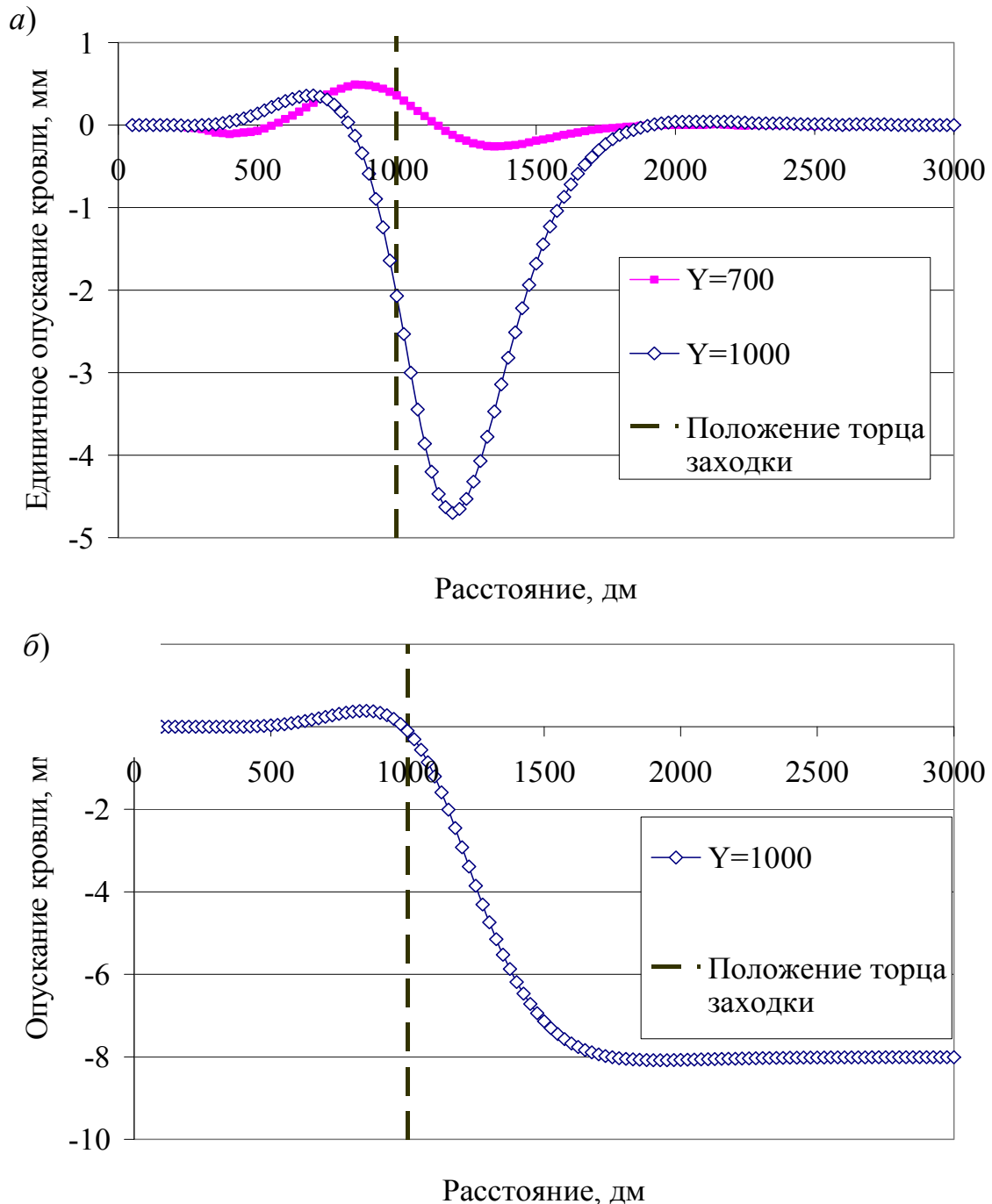


Рис. 6. Опускания кровли: (а) - дополнительные вызванные единичной выемкой; (б) - полные в результате прохода комбайна

На этом рисунке приведены эпюры оседаний непосредственной кровли в окрестности торцевой части очистного забоя, указанной вертикальной пунктирной линией. Кривая, обозначенная как « $Y=1000$ », соответствует сечению А-А на рис. 5, которое было проведено вдоль линии с координатой расчетной области, равной

$Y=1000$ дм. Сечение А–А проходит вдоль очистного забоя у козырьков секций механизированной крепи, где можно поставить измерительную стойку или закрепить другой инструмент для контроля оседания и других деформаций кровли. Для сравнения показано оседание непосредственной кровли, вызванное единичной выемкой пласта у посадочного ряда гидравлических стоек крепи. Кривая обозначена как « $Y=700$ », поскольку на расчетной схеме рис. 5 сечение Б–Б было проведено на координате $Y=700$ дм. Как видим, сдвиги непосредственной кровли у посадочного ряда механизированной крепи, вызванные единичной выемкой пласта, не существенны. Это следует учесть при разработке деталей методики инструментальных наблюдений за проседанием кровли в шахтных условиях.

Отметим, что впереди движущегося шнека очистного комбайна отмечается локальное незначительное поднятие кровли (0,36 мм) за счет процессов ее коробления. Эта величина относительного мгновенного поднятия может иметь место в действительности, однако ее трудно уловить инструментальными измерениями в силу трех существенных причин: недоступности, кратковременности и малости. Поскольку акт элементарной выемки пласта длится считанные секунды, релаксационные процессы не успевают проявиться. На рис. 6, б показано суммарное оседание кровли после полного прохода комбайна. Максимальная величина оседания составляет 8,1 мм, что почти вдвое больше максимума оседания, вызванного элементарной выемкой.

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что область возмущений, вызванных в непосредственной кровле в результате единичной выемки угольного пласта на длину заходки, имеет форму несимметричной воронки (мульды). Центр мульды находится на пересечении отстающей линии очистного забоя и торца заходки в момент начала формирования единичной выемки. При этом, длинная ось воронки вытянута в сторону вынимаемой заходки и развернута под углом 30° на выработанное пространство, а размеры мульды составляют 5-7 на 10-12 величин заходки.

Список литературы

1. Boitnott G.N. Constructing a general rheological model for rock deformation / Boitnott G.N. / in Proceedings of the 18th Annual Seismic Research Symposium on Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty. – 1996. – PL-TR-96-2153. – P. 149–158.
2. Назимко И.В. Термодинамический анализ вариаций деформационных свойств породы / И.В. Назимко // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – 2010. – №7. – С. 98 – 112.
3. Взаимодействие механизированных крепей с кровлей / А.А. Орлов и др. – М.: Недра, 1976. – 336 с.
4. Кузнецов С.Т. Исследование закономерностей разрушения и взаимодействия пород с крепями очистных выработок на пологих угольных пластах / С.Т. Кузнецов // Горное давление, сдвиги горных пород и методика маркшейдерских работ. Сб. трудов ВНИМИ. – 1970. – №76. – С. 106-117.
5. Якоби О. Практика управления горным давлением / О. Якоби. – М.: Недра, 1987. – 568 с.
6. Хервиг Г. Влияние механизированной крепи на состояние кровли в лаве / Г. Хервиг, О. Якоби // Глюкауф. – 1971. – № 22. – С. 11-25.
7. Хервиг Г. Можно ли избежать вывалов и образования ступеней в кровле путем повышения сопротивления крепи? / Г. Хервиг // Глюкауф. – 1977. – № 15. – С. 33-36.
8. Грядущий Ю.Б. Геомеханические основы управления вывалоопасными кровлями в очистных забоях / Ю.Б. Грядущий. – К.: Техніка, 1998. – 100 с.
9. Брюханов О.М. Геомеханічне обґрунтування способів та засобів підвищення стійкості покрівлі у лавах пологих і похилих пластів Донбасу: автореф. дис.. канд. техн. наук: 05.15.11 / О.М. Брюханов; Донецьке виробниче об'єднання по видобутку вугілля «Донецьквугілля». – Донецьк. – 1998. – 17 с.
10. Иванов І.Є. Удосконалення методу прогнозування зон обвалень порід безпосередньої покрівлі у очисних вибоях тонких похилих пластів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.15.11 / І.Є. Иванов; НАН України; Інститут геотехнічної механіки. – Д., 2000. – 17 с.

11. Якоби О. Вывалы пород из кровли в подземных условиях и на моделях и выводы в отношении механизированных крепей / О. Якоби, Г. Эверлинг, Г. Ирресбергер // Глюкауф. – 1964. – №24. – С. 1563-1579.
12. Якоби О. Вывалы пород из кровли в очистных забоях с механизированной крепью и предложения по их предотвращению / О. Якоби // Глюкауф. – 1963. – №14. – С. 882-889.
13. Зубов В.П. Влияние горно-геологических факторов на интенсивность вывалов в лавах / В.П. Зубов // Уголь. – 1986. – №11. – С. 17-19.
14. Черняк И.Л. Устойчивость кровли и вывалы пород в очистных забоях / И.Л. Черняк, Н.В. Чехмистренко, Ю.Б. Грядущий // Уголь Украины. – 1993. – №5. – С. 12-13.
15. Ирресбергер Г. Требования к управлению горным давлением в лавах / Г. Ирресбергер // Глюкауф. – 1981. – №2. – С. 7-10.
16. Ляшок Я.О. Розробка способу запобігання вивалів порід покрівлі в лавах пологих пластів при вийманні вугілля механізованими комплексами: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.15.02 / Я.О. Ляшок; Донецький держ. технічний ун-т. – Донецьк, 2000. – 23 с.
17. Баклашов И.В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1984. – 415 с.
18. Кузяра С.В. Прогноз динамического проявления горного давления при отработке лавы в свите сближенных пластов / С.В. Кузяра, А.И. Хохотва, И.А. Ефремов // Проблемы гірського тиску. Збірник наукових праць ДонНТУ. – 2004. – № 11. – С. 177-191.

Надійшла до редакції 09.11.2012

I.V. Nazimko

Виконано комп'ютерне моделювання зрушень та деформацій безпосередньої покрівлі при відпрацюванні вугільного пласта

Ключові слова: очисні роботи, лава, тиск, деформація.

I.V. Nazimko

Computer simulation of displacements and deformations of direct roof coal seam have been performed

Keywords: longwall, drift, deformatoins, strain.