

И.А. Ковалевская, В.Г. Снигур, Р.Н. Свистун

## ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПОЧВЫ И КРЕПИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ НА СВЕРХГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТАХ

*Рассмотрены особенности формирования напряженно-деформированного состояния пород почвы и крепи пластовой горной выработки, проводимой в тонкослоистом массиве на больших глубинах.*

### ДОСЛІДЖЕННЯ НДС ПІДОШВИ І КРІПЛЕННЯ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ НА НАДГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТАХ

*Розглянуто особливості формування напружено-деформованого стану порід підшви та кріплення пластової гірничої виробки, що проводиться в тонкошаруватому масиві на великих глибинах.*

### RESEARCH OF STRESS-STRAIN-STATE AND MINE WORKING SUPPORT ON ULTRADEEP HORIZONS

*Specialties of strain-stress state formation of soil and support in-seam mine working which is drivage in foliated massif on big depth are examined.*

Геомеханическая модель горной выработки с крепью КМП-А3-13,8 из СВП-27 разработана и исследована методом конечных элементов (МКЭ) для условий ее поддержания на горизонте 1200 м и в угле-вмещающем тонкослоистом массиве с изменяющимся коэффициентом пород  $f = 4...11$ . Непосредственная почва пласта представлена глинистым сланцем «кучерявчик» мощностью  $m_1^II = 0,65$  м, сопротивлением сжатию  $\sigma_{сж1}^II = 40$  МПа и модулем деформации  $E_1^II = 1 \cdot 10^4$  МПа. Основная почва пласта моделируется пятью породными слоями (в порядке убывания по глубине от угольного пласта): песчаник  $m_2^II = 2,2$  м,  $\sigma_{сж2}^II = 100$  МПа и  $E_2^II = 5,3 \cdot 10^4$  МПа; песчаный сланец  $m_3^II = 1,2$  м,

$\sigma_{сж3}^II = 80$  МПа,  $E_3^II = 2,7 \cdot 10^4$  МПа; глинистый сланец  $m_4^II = 2,2$  м,  $\sigma_{сж4}^II = 45$  МПа и  $E_4^II = 1,5 \cdot 10^4$  МПа; песчаный сланец «кучерявчик»  $m_5^II = 0,4$  м,  $\sigma_{сж5}^II = 80$  МПа,  $E_5^II = 2,7 \cdot 10^4$  МПа; песчаник  $m_6^II = 5,1$  м,  $\sigma_{сж6}^II = 100$  МПа и  $E_6^II = 5,3 \cdot 10^4$  МПа.

Шахтные наблюдения за смещениями породного контура зафиксировали неудовлетворительное состояние пород почвы, а сам процесс пучения, так или иначе, называется на формировании нагрузок на рамную крепь. Поэтому целью исследований является установление особенностей напряженно-деформированного состояния (НДС) почвы воздухоподающего штрека и применяемой крепи серии КМП-А3-13,8 на сверхглубоком горизонте.

В породах почвы, примерно, по ширине выработки образуется зона разгрузки, где сжимающие вертикальные напряжения  $\sigma_y = \lambda H$  снижаются и, по мере приближения к контуру штрека, переходят в растягивающие  $\sigma_y$ , представляющие наибольшую опасность с точки зрения сохранения целостности породы. Форма зоны разгрузки в почве аналогична таковой в кровле и напоминает «перевернутый» свод, обращенный основанием к выработке. Одной из особенностей является то, что размеры зоны разгрузки в почве существенно больше, чем в кровле (на 42-57%). Так, разгрузка порядка  $\sigma_y = (0,1...0,2)\lambda H$  распространяется на всю мощность песчаника и песчаного сланца, достигая верхней части слоя из глинистого сланца. Достаточно значительная глубина (до 4 м) такого уровня разгрузки таит опасность в плане потери устойчивости почвы по двум причинам:

– во-первых, вышележащая область растягивающих  $\sigma_y$  разупрочняет песчаник, в результате чего практически исчезает подпор разрушенной области на нижележащую устойчивую область; трехосное НДС переходит в двухосное и активизирует процесс перемещения более глубоких пород почвы – растягивающие  $\sigma_y$  распространяются глубже и зона разупрочнения увеличивается;

– во-вторых, действуют разупрочняющие породу факторы (реологии, трещиноватости, обводненности и т.п.), которые также интенсифицируют перемещение более глубоко залегающих пород в полость выработки. Даже в самом идеализированном случае растягивающие  $\sigma_y$  неминуемо разупрочняют почву на глубину до 2,7 м, то есть на всю мощность песчаника, что объясняет парадоксальную на первый взгляд ситуацию развития пучения в песчанике крепостью  $f = 9...11$  по шкале проф. М.М. Протодьяконова. Основная причина такого явления заключается не в высокой крепости песчаника, а в действии

растягивающих напряжений  $\sigma_y$ , которым песчаник, как и любая другая горная порода, сопротивляется весьма слабо, а, с учетом естественной трещиноватости, можно достаточно обоснованно утверждать, что такое сопротивление перпендикулярно главной системе трещин практически отсутствует.

Анализ поля распределения горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  в почве штрека выявил ряд особенностей. Непосредственная почва, представленная глинистым сланцем, находится в разгруженном состоянии при действии как сжимающих, так и растягивающих горизонтальных напряжений на уровне  $\sigma_x = (0...0,15)\lambda H$ . Это вполне объяснимо, так как непосредственная почва имеет небольшую жесткость (малая мощность и низкие механические характеристики) и находится под защитой более крепкого и мощного песчаника основной почвы. Тем не менее, даже при небольших растягивающих напряжениях  $\sigma_x$  слабый глинистый сланец разупрочняется, но из-за небольшой мощности в геомеханических процессах пучения играет второстепенную роль. Наиболее нагруженным является первый породный слой основной почвы, представленный песчаником: в его верхней части по всей ширине выработки, примерно, на треть мощности, действуют растягивающие  $\sigma_x$ , способствующие разупрочнению песчаника; в нижней части песчаника (также, примерно, на треть мощности) наблюдается концентрация сжимающих  $\sigma_x = (2...2,5)\lambda H$ . В этой связи представляет интерес эффект от комбинации действий компонент  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$ : средняя треть мощности песчаника разгружена от сжимающих  $\sigma_x$ , но здесь действуют растягивающие  $\sigma_y$ , нарушающие его целостность; в нижней трети мощности песчаника концентрация сжимающих  $\sigma_x$  сама по себе не способна разупрочнить песчаник, но она усиливает действие уже за-

тухающих растягивающих  $\sigma_y$  (по теории прочности Кулона-Мора), что в результате также приводит к разупрочнению песчаника. Таким образом, по всей мощности породного слоя из песчаника происходит его разупрочнение непосредственно под выработкой. Также обращает внимание характер изгиба слоя из песчаника – под выработкой прогиб происходит в полость штрека, а за его пределами кривизна линии изгиба меняет знак и зоны разгрузки от горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  появляются уже в нижней части мощности песчаника; причем по восстанию пласта возникают в ограниченной области растягивающие  $\sigma_x$ . Эта зона разгрузки достаточно обширна и за пределами выработки распространяется до 5 – 6,5 м с каждой стороны, а ее влияние на целостность песчаника заключается в том, что чем меньше сжимающие  $\sigma_x$ , тем больший разупрочняющий эффект способны создать повышенные сжимающие  $\sigma_y$  в зоне опорного давления, куда как раз попадает исследуемая область. В меньшей степени, но аналогичные геомеханические процессы протекают и в нижележащем песчаном сланце, где отчетливо прослеживается его прогиб в направлении штрека.

Минимальные значения приведенных напряжений (до 5 МПа) располагаются в непосредственной почве под выработкой, а ее второстепенное влияние на процесс пучения было отмечено ранее. Второй слой почвы – песчаник – имеет по ширине выработки достаточно значительные колебания  $\sigma = 5...30$  МПа. В центральной (по мощности и ширине выработки) части слоя располагается ядро разгрузки (примерно  $0,9 \times 1,2$  м), где величина  $\sigma$  составляет 5-8 МПа. Природа формирования этого ядра очевидна – горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  в центральной части изгибающегося слоя всегда имеют минимум, а вертикальные напряжения  $\sigma_y$  также невелики. Таким образом, сочетание небольших значений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  (по теории прочности Куло-

на-Мора) не дает в результате сколь-нибудь значительной величины приведенных напряжений. Ближе к границам зоны разгрузки  $\sigma$  увеличивается до 25-35 МПа, но эти значения остаются в несколько раз меньше сопротивления песчаника сжатию и по фактору действия  $\sigma$  разупрочнения песчаника под выработкой в пределах ее ширины не должно происходить вопреки визуальным наблюдениям. Объясняется это противоречие исключительно действием растягивающих напряжений (в большей степени вертикальных  $\sigma_y$ , в меньшей – горизонтальных  $\sigma_x$ ), что было доказано ранее при анализе эпюр  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$  – по всей мощности песчаника (по ширине выработки) происходит его разупрочнение, что интенсифицирует пучение почвы воздухоподающего штрека. Тогда представляет интерес следующий вопрос – а расширяется ли зона разупрочнения песчаника за пределы выработки или локализуется только по ее ширине? Анализ распределения приведенных напряжений  $\sigma$  в песчанике за пределами выработки дал такие результаты. В песчанике образуются две области шириной до 1-1,2 м и глубиной до 1,1-1,4 м, которые располагаются ниже опор стоек крепи и выходят за габариты выработки. В этих областях действуют повышенные сжимающие  $\sigma_y$  и пониженной величины сжимающие  $\sigma_x$ ; в совокупности компоненты  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$  генерируют значения приведенных напряжений  $\sigma$ , приближающихся к величине сопротивления песчаника сжатию, но не превышающих ее. Однако, устойчивое состояние песчаника в областях концентрации  $\sigma$  может быть нарушено под воздействием известных разупрочняющих породу факторов реологии, трещиноватости и обводненности. Тогда локальные нарушения в песчанике могут распространяться за пределы выработки в рамках, установленных размеров зон концентрации  $\sigma$ , что в целом усилит проявления пучения почвы штрека.

Таким образом, в основной почве, верхний слой которой представлен крепким песчаником достаточной мощности (2,2 м), происходит активный процесс разупрочнения, что проявляется в интенсивном печении почвы, который провоцируется высоким опорным давлением в боках выработки, обусловленным ее размещением на глубине 1200 м. В связи с установленными геомеханическими процессами для обеспечения требуемого эксплуатационного состояния штрека необходима разработка технических мероприятий по повышению устойчивости его почвы.

Верхняя рамная крепь подвержена действию знакопеременных напряжений  $\sigma_y$ : в центральной части (в районе замка свода) по длине 1-1,2 м в верхних волокнах сечения и 1,3-1,6 м в нижней части сечения СВП действуют растягивающие  $\sigma_y$  до 15 МПа, которые более чем на порядок меньше предела текучести стали Ст.5 и не представляют опасности для устойчивости рамы. По мере движения к стойкам рамы (в районе замков) вертикальные напряжения меняют знак и переходят в сжимающие относительно небольшой величины  $\sigma_y = 30...70$  МПа, что связано с геометрией свода, когда ближе к его пяте плоскость поперечного сечения СВП поворачивается под все большее воздействие вертикальной составляющей горного давления. В стойках рамы наблюдаются наибольшие сжимающие усилия  $\sigma_y$  до 140 МПа, ведь они аккумулируют всю вертикальную нагрузку на крепь. Величина действующих напряжений, примерно, в два раза меньше предела текучести стали Ст. 5, что обуславливает устойчивость стоек рамы и крепи в целом. Однако, обращает внимание активное действие изгибающих моментов в стойках, о чем свидетельствует резкое изменение величины  $\sigma_y$  в пределах одного сечения – от 20-30 МПа до 120-140 МПа. Наиболее значительные изгибающие моменты наблюдаются в трех областях по высоте стойки: первый – на расстоянии от почвы выработки 1,2-1,7 м; второй – менее

обширный – на высоте 0,5-0,8 м, но уже с обратным знаком изгибающего момента; третий – в районе опоры стойки – на высоте 0-0,2 м также меняет знак изгибающего момента по отношению к предыдущему. Таким образом, наблюдаются три максимума изгибающего момента знакопеременной величины по высоте стойки, которые пока не представляют опасности, но в случае ухудшения горно-геологической ситуации от действия ослабляющих породу факторов или влияния очистных работ, изгибающие моменты, генерируемые  $\sigma_y$ , могут привести к потере устойчивости стоек рамы.

Изучение поля распределения горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  в рамной крепи привело к следующим результатам. Практически по всему контуру верхняя находится под действием сжимающих  $\sigma_x$  до 40 МПа, которые многократно меньше допустимых напряжений. Обращает внимание достаточная равномерность (по площади сечения СВП) распределения  $\sigma_x$ , что свидетельствует о незначительном изгибе верхняка. В совокупности с небольшим градиентом изменения  $\sigma_y$ , можно утверждать, что верхняя рамы не подвержена существенным изгибающим моментам и находится в достаточно устойчивом состоянии. В стойках крепи действуют знакопеременные  $\sigma_x$  от небольших растягивающих до сжимающих порядка 5-25 МПа. Здесь уже прослеживается более высокий градиент изменения  $\sigma_x$  в пределах одного сечения, что свидетельствует о действии изгибающих моментов по высоте стойки, но меньшей величины, чем от вертикальных напряжений  $\sigma_y$ .

Основная особенность эпюры  $\sigma$  заключается в относительно равномерном распределении приведенных напряжений по всему контуру рамы, а величина  $\sigma$  в несколько раз меньше предела текучести стали Ст. 5, что свидетельствует об устойчивом состоянии рамной крепи в целом. Причина такого явления на большой глу-

бине видится в действии двух факторов: во-первых, в кровле и боках образуется разупрочненная область приконтурных пород, которая выполняет функции демпфера, более равномерно распределяющего нагрузку по контуру рамы; во-вторых, соотношение вертикальных и боковых нагрузок таково, что максимумы изгибающих моментов относительно невелики и напряжения в самой раме достаточно равномерно распределены. Однако, следует помнить о густой сети знакопеременных максимумов изгибающего момента в стойках крепи, которые при ухудшении горно-геологических условий могут сказаться на устойчивости рамы в целом.

## ВЫВОДЫ

1. Несмотря на высокое сопротивление песчаника сжатию, представляющего первый породный слой основной почвы, происходит его разупрочнение, распространяющееся на всю мощность (в районе вертикальной оси выработки), а по бокам – до половины мощности песчаника. В пределах ширины выработки процесс разупрочнения песчаника происходит преимущественно от действия растягивающих вертикальных напряжений  $\sigma_y$ , которое усиливается в верхней трети слоя распространением растягивающих горизонтальных напряжений  $\sigma_x$ . Под опорами стоек рамной крепи образуются локальные области, выходящие за пределы ширины выработки, где возможно разупрочнение песчаника от

совместного действия сжимающих  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$ . Образовывается сводчатая форма (с малой стрелой подъема) достаточно обширной области разупрочненного песчаника, которая является основной причиной интенсивного проявления пучения пород почвы выработки.

2. Верхняя рамная крепь находится в устойчивом состоянии по факторам поля распределения всех трех компонент напряжений –  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  и  $\sigma$ . Малозначимые изгибающие моменты по длине верхняка позволяют утверждать о вполне нормальном состоянии кровли выработки. В стойках рамной крепи действуют знакопеременные изгибающие моменты, генерируемые в основном компонентой  $\sigma_y$ , которые на момент исследуемой горно-геологической ситуации не представляют опасности в плане потери устойчивости стоек рамы. При ухудшении горно-геологической ситуации из-за действия ослабляющих породу факторов или влияния очистных работ наиболее слабым элементом будут именно стойки рамы. Достаточно устойчивое состояние рамной крепи в целом обусловлено образованием в кровле и боках штрека относительно небольшой толщины оболочки из разупрочненных пород, которая демпфирует концентрации напряжений в приконтурных породах и более равномерно распределяет нагрузку на крепь, что, при прочих равных условиях, увеличивает ее несущую способность.



## ОБ АВТОРАХ

*Ковалевская Ирина Анатольевна – д.т.н., профессор кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.*

*Снигур Василий Григорьевич – директор ПСП «Шахтоуправление «Терновское» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь».*  
*Свистун Руслан Николаевич – директор ООО «Мокрянский горнодобывающий карьер».*

