

УДК 539.32:622.831:622.234.5

Поляков Ю.Е., магистр
(ИГТМ НАН Украины)**ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАЗГРУЗКИ УВЛАЖНЕННОГО
УГОЛЬНОГО МАССИВА****Поляков Ю.Є.**, магістр,
(ІГТМ НАН України)**ДЕФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ РОЗВАНТАЖЕННЯ ЗВОЛОЖЕНОГО
ВУГІЛЬНОГО МАСИВУ****Polyakov Yu.Ye.**, Master of Sciences
(IGTM NAS of Ukraine)**THE DEFORMATION MODEL OF THE WET COAL-MASS UNLOADING**

Аннотация. В данной статье рассматривается разгрузка пласта, который не находится в предельно напряженном состоянии. Принимается, что несущая способность пласта, даже пониженная из-за водонасыщения, все же превосходит горное давление. В качестве фактора разгрузки выступает снижение модуля упругости с повышением влажности угля. Полагается, что деформации ξ_x , ξ_y , ξ_z в сухом и увлажненном угле одинаковы. При малой площади увлажнения всю нагрузку от кровли воспринимает сухой уголь, площадь которого только чуть-чуть меньше первоначальной. При уменьшении площади сухого угля вертикальные напряжения в нем увеличиваются и вызывают заметный рост дополнительной вертикальной деформации, которая передается на влажный уголь и вызывает в нем дополнительные напряжения. Снижение прочности влажного угля является главным фактором, определяющим степень разгрузки от горного давления краевой части пласта при гидрорыхлении.

Ключевые слова: гидросиловая, деформационная разгрузка, модуль упругости, влажность угля, предел прочности, гидрорыхления, площадь увлажнения.

Актуальность задачи. Снижение предела прочности угля, как за счет повышения влажности, так и за счет снижения контактного трения, уменьшают несущую способность пласта при его напорной гидрообработке.

Если пласт находится в предельном напряженном состоянии, то снижение предела прочности из-за водонасыщения переводит его в запредельное состояние, сопровождающееся трещинообразованием и разгрузкой. Но трещинообразование происходит не от давления воды, а от горного давления, которое становится больше предела прочности влажного пласта. Такую модель разгрузки предельно напряженного пласта, при которой трещинообразование зависит не от давления воды, а от горного давления, превышающего предел прочности увлажненного угля можно назвать горно-силовой. Для более полного понятия о процессе следует рассмотреть и проанализировать поведение пласта не в предельно напряженном состоянии, когда модуль его упругости снижается при повышении влажности.

Основное содержание работы. Рассмотрим разгрузку пласта, который не

находится в предельно напряженном состоянии [3]. Будем считать, что несущая способность пласта, даже пониженная из-за водонасыщения, все же превосходит горное давление. В этом случае, в качестве фактора разгрузки может выступать снижение модуля упругости с повышением влажности угля.

Для анализа воспользуемся решением Ламе, определяющим упругие напряжения и перемещения в толстостенном цилиндре с центральным отверстием (рисунок 1).

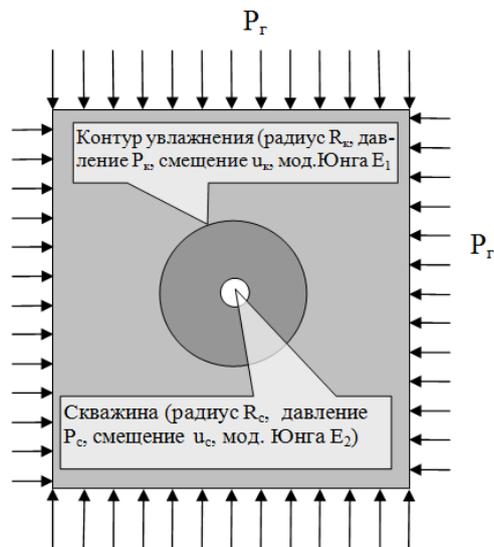


Рисунок 1 – Расчетная схема бесконечного массива при нагнетании воды через скважину

Формула Ламе для радиального перемещения

$$u = \frac{(1 - \mu)(r_1^2 P_1 - r_2^2 P_2)r}{E(r_2^2 - r_1^2)} + \frac{(1 + \mu)(P_1 - P_2)r_1^2 r_2^2}{Er(r_2^2 - r_1^2)} \quad (1)$$

где r_1, r_2 – радиусы внутреннего и внешнего контуров; r – радиус контура на котором определяются смещения; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; P_1, P_2 – радиальные напряжения (давления) на внутреннем и внешнем контуре.

Смещения контура увлажнения u_k можно выразить двумя способами – через смещения не увлажненного массива $u_{внешн}$, полагая $r_1 = R_k, r_2 = R_\infty = \infty, P_1 = P_k, P_2 = P_2$ и через смещения увлажненного массива $u_{внутр}$, полагая $r_1 = R_c, r_2 = R_k, P_1 = P_c, P_2 = P_k$.

Поскольку способ расчета смещения не влияет на его величину, можно записать

$$u_k = u_{внешн} = u_{внутр} \quad (2)$$

Решая уравнение (2) можно определить напряжения на контуре увлажнения и величину его смещения.

Определим по (1) смещение $u_{внешн}$:

$$u_{внешн} = \frac{P_k R_k (1 + \mu) - 2R_k P_\Gamma}{E_1} \quad (3)$$

Определим по (1) смещение $u_{внутр}$:

$$u_{внутр} = \left[\frac{R_k (1 - \mu) R_c^2 P_c}{E_2 (R_k^2 - R_c^2)} + \frac{(1 + \mu) R_c^2 R_k P_c}{E_2 (R_k^2 - R_c^2)} \right] - P_k \left[\frac{R_c^2 R_k (1 + \mu)}{E_2 (R_k^2 - R_c^2)} + \frac{R_k (1 - \mu) R_k^2}{E_2 (R_k^2 - R_c^2)} \right] \quad (4)$$

Приравниваем $u_{внутр} = u_{внешн}$ и находим P_k

$$P_k^* = \frac{2E^*P_c^* + 2(R_k^* - 1)}{E^*[(1 + \mu) + R_k^*(1 - \mu)] + (1 + \mu)(R_k^* - 1)} \quad (5)$$

В этой формуле приняты обозначения:

$$E^* = E_1/E_2; \quad R_k^* = R_k^2/R_c^2; \quad P_k^* = P_k/P_c; \quad P_c^* = P_c/P_r \quad (6)$$

Полученная формула (5) определяет радиальные напряжения (давление) на контуре увлажненной части массива и содержит два значения модуля упругости, входящих в безразмерный параметр E^* .

Воспользуемся этой формулой для анализа влияния влажности на напряженное состояние массива.

На рисунке 2 представлены зависимости радиальных напряжений (давления) на контуре нагнетания в зависимости от его радиуса.

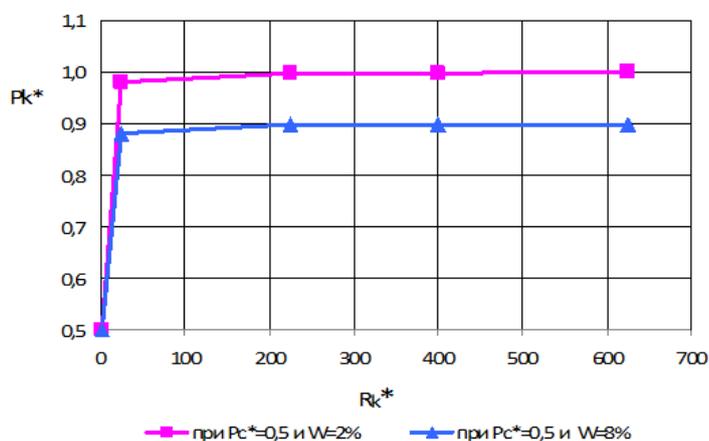


Рисунок 2 – Зависимость радиальных напряжений (P_k/P_r) на контуре увлажнения от его радиуса (R_k/R_c)²

влажности 8%.

Рисунок 2 показывает, что давление на контуре увлажнения снижается примерно на 10% по сравнению с давлением при естественной влажности (2%). Т.е. наблюдается деформационная разгрузка влажной зоны.

На расстояниях в 15 радиусов скважины и более радиальные напряжения практически достигают величины горного давления в массиве с естественной влажностью. Радиальные напряжения во влажном массиве на этих расстояниях от скважины тоже стабилизируются, достигнув максимальных значений, определяемых влажностью.

Зависимость радиальных напряжений (давления) на контуре увлажнения от влажности представлена на рисунке 3.

Как видим, радиальные напряжения снижаются с ростом влажности практически по линейному закону. Темп снижения напряжений, или внешнего давления на увлажненную область составляет, приблизительно 1,7 % на каждый про-

По вертикальной оси отложено безразмерное давление P_k^* , по горизонтальной – безразмерный радиус R_k^* . Напомним, что безразмерный радиус равен отношению квадратов радиусов. Поэтому, его максимальное значение на шкале рисунка равно 700 соответствует радиусу контура увлажнения $\approx 0,6$ м при радиусе скважины 0,225 м. Рисунок 2 построен при значении давления в скважине равным половине горного. Приведенный модуль упругости E^* равен 1 для влажности 2 % и 1,3 для

цент прироста влажности. Напомним, что снижение модуля упругости составляет 5% на каждый процент прироста влажности.

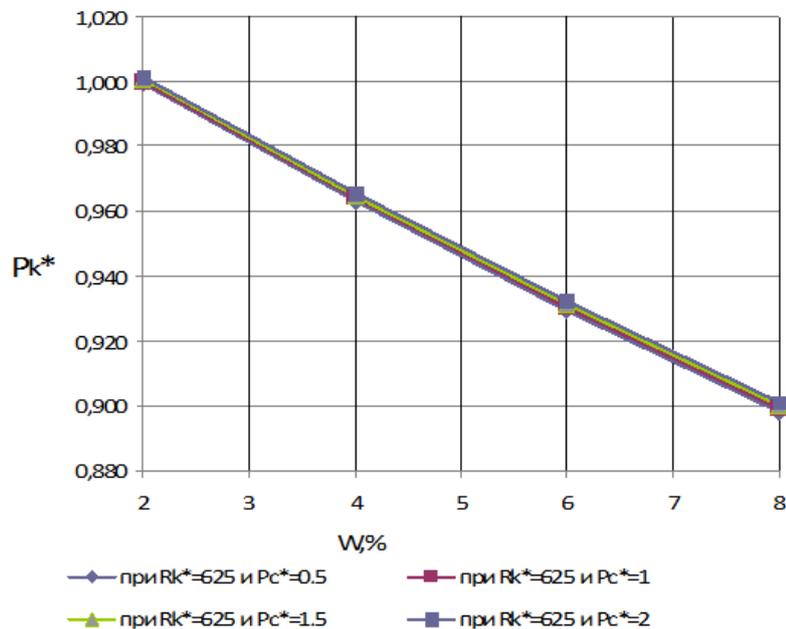


Рисунок 3 – Зависимость радиальных напряжений (P_k/P_2) на контуре увлажнения от влажности

деформационной разгрузки от горного давления.

На контуре увлажнения радиальные смещения определяются формулой (3). Будем считать, что расстояние R_k до контура увлажнения превышает 15 радиусов скважины R_c . Тогда можно принять, что на будущем контуре увлажнения радиальные напряжения P_k равны горному давлению P_2 . В этом случае радиальные смещения в массиве с естественной влажностью

$$u_{кcyx} = P_2 R_k (\mu - 1) / E_1 \quad (7)$$

После того, как вода распространилась на расстояние R_k , давление на контуре увлажнения снизилось до величины P_k , а радиальные смещения влажного контура

$$u_{квл} = P_2 R_k [P_k^* (1 + \mu) - 2] / E_1 \quad (8)$$

Произведя почленное деление (8) на (7) получим

$$u_{квл} / u_{кcyx} = [P_k^* (1 + \mu) - 2] / (\mu - 1) \quad (9)$$

Подставляя в (9) значение $P_k^* = 0,9$ и значение $\mu = 0,25$, получим верхнюю оценку смещений влажного контура $u_{квл} / u_{кcyx} = 1,17$. Т.е. снижение напряжений во влажном массиве на 10 % сопровождается увеличением смещений контура увлажнения на 17 %.

При этом давление в скважине практически не влияет на показатели деформационной разгрузки увлажненного массива. Линии, построенные при разных значениях P_c^* в диапазоне от 0,5 до 2, сливаются.

Таким образом, основным фактором деформационной разгрузки увлажненного массива от горного давления на расстояниях более $15 R_c$ является прирост его влажности.

Оценим дополнительные радиальные смещения массива в результате его

Радиальные смещения контура скважины определяются формулой (1). Будем считать, что расстояние R_k до контура увлажнения превышает 15 радиусов скважины R_c . Тогда можно принять, что на будущем контуре увлажнения радиальные напряжения P_k равны горному давлению P_z . В этом случае радиальные смещения скважины в массиве с естественной влажностью

$$u_{\text{сух}} = R_c [(1+\mu)P_c - 2P_z] / E_1 \quad (10)$$

После того, как контур увлажнения достигнет расстояния 15 радиусов скважины радиальные смещения ее контура можно выразить (10) в котором вместо P_z надо взять P_k , а вместо E_1 взять E_2

$$u_{\text{вл}} = R_c [(1+\mu)P_c - 2P_k] / E_2 \quad (11)$$

Произведя почленное деление (11) на (10) и воспользовавшись (6) получим

$$u_{\text{вл}} / u_{\text{сух}} = E^* [(1+\mu)P_c^* - 2P_k^*] / [(1+\mu)P_c^* - 2] \quad (12)$$

Последняя формула показывает, что радиальные смещения контура скважины существенно зависят от давления нагнетания. Однако, до значений $P_c^* = \frac{P_c}{P_r} \leq 0,4$, смещения влажного контура $u_{\text{вл}} / u_{\text{сух}} = 1,17$ (для $P_k^* = 0,9$ и $E^* = 1,3$) и практически не зависят от давления в скважине и коэффициента поперечного расширения μ .

Т.е. снижение напряжений во влажном массиве на 10% сопровождается увеличением радиальных смещений не только на контуре увлажнения, но и на контуре скважины на 17%.

До сих пор мы рассматривали бесконечный угольный массив. Однако, реальные угольные пласты в Донбассе ограничены высотой 1 – 1,5 м и расположены между породами кровли и почвы, которые являются существенно более жесткими, чем уголь.

Для дальнейшего анализа процесса деформационной разгрузки выберем расчетную схему угольного пласта с жесткими недеформируемыми вмещающими породами – кровлей и почвой, изображенную на рисунке 4.

Давление нагнетания воды, распространяющейся из вертикальной скважины в центре увлажненной зоны, будем считать чуть большим, чем давление газа в пласте. И его влияние на напряженное состояние пласта учитывать не будем.

Вертикальные напряжения, возникающие от действия горного давления P_z , обозначены на рис.4 символом P_z для сухой части пласта и σ_z для влажной части пласта.

Боковые напряжения обозначены символами P_y, P_x для сухой части пласта и σ_y, σ_x – влажной части пласта. Напряжения σ_y, σ_x на рисунке 4 не показаны. Площадь пласта обозначим символом S , а влажной части пласта – S_B .

$$P_r S = S_B \sigma_z + P_z (S - S_B) \quad (13)$$

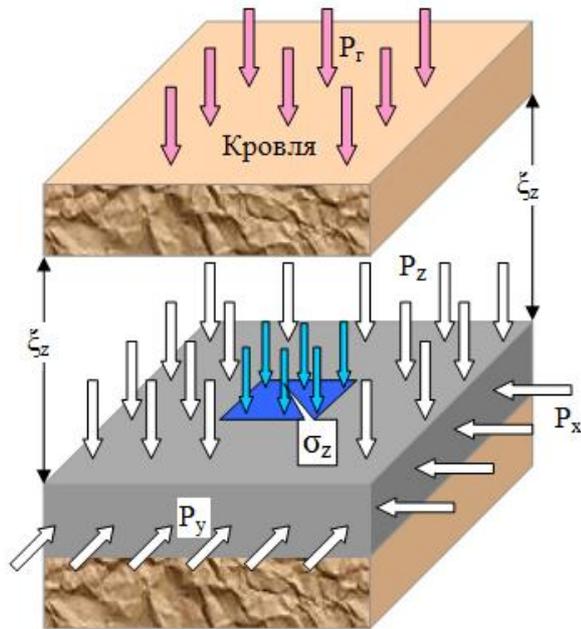


Рисунок 4 – Расчетная схема пласта с жесткими кровлей и почвой

Тогда можно сразу записать условие равновесия кровли.

Полагая, что деформации ξ_x , ξ_y , ξ_z в сухом и увлажненном угле одинаковы, запишем для сухого и увлажненного угля обобщенный закон Гука

$$\begin{cases} E_0 \xi_x = P_x - \mu_0(P_z + P_y) \\ E_0 \xi_y = P_y - \mu_0(P_z + P_x) \\ E_0 \xi_z = P_z - \mu_0(P_x + P_y) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} E_1 \xi_x = \sigma_x - \mu_1(\sigma_z + \sigma_y) \\ E_1 \xi_y = \sigma_y - \mu_1(\sigma_z + \sigma_x) \\ E_1 \xi_z = \sigma_z - \mu_1(\sigma_x + \sigma_y) \end{cases} \quad (15)$$

где E_0 , μ_0 – модуль упругости и коэффициент Пуассона для сухого угля; E_1 , μ_1 – модуль упругости и коэффициент Пуассона для влажного угля.

На данном этапе выполнения работы будем считать, что пласт находится в условиях равнокомпонентного горизонтального сжатия. Тогда

$$P_x = P_y = P; \quad (16)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma; \quad (17)$$

Преобразовав уравнение (14) и (15) используя условия (16) и (17) получим:

$$\begin{cases} E_0 \xi = P - \mu_0(P_z + P) \\ E_0 \xi_z = P_z - 2P\mu_0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} E_1 \xi = \sigma - \mu_1(\sigma_z + \sigma) \\ E_1 \xi_z = \sigma_z - 2\sigma\mu_1 \end{cases} \quad (19)$$

Выражаем P_z и σ_z из уравнений (18) и (19):

$$P_z = E_0 \xi_z + 2\mu_0 P \quad (20)$$

$$\sigma_z = E_1 \xi_z + 2\mu_1 \sigma \quad (21)$$

Полученные выражения (20) и (21) подставляем в условие (13):

$$(E_0 \xi_z + 2\mu_0 P)(S - S_e) + S_e (E_1 \xi_z + 2\mu_1 \sigma) = P_r S \quad (22)$$

Для дальнейших расчётов нам нужно определить ξ_z , для этого и последующих манипуляций, а также для построения графиков, следует сделать все переменные значения относительными величинами.

Введем ряд обозначений

$$E_{om} = E_1/E_0 \quad (23)$$

$$S_{om} = a^2/A^2 \quad (24)$$

$$P_{z.om} = P_z/P_\Gamma \quad (25)$$

$$\sigma_{z.om} = \sigma_z/P_\Gamma \quad (26)$$

$$P_{om} = P/P_z = \sigma/P_\Gamma \quad (27)$$

Теперь частично раскроем скобки в уравнении (22)

$$E_0 \xi_z (S - S_\theta) + 2\mu_0 P (S - S_\theta) + E_1 \xi_z S_\theta + 2\mu_1 \sigma S_\theta = P_\Gamma S$$

Подставляем в полученное выражение относительную величину (24) и преобразуя его, получим значение вертикальной деформации

$$\xi_z = \frac{P_\Gamma - 2\mu_0 P (1 - S_{OT}) - 2\mu_1 \sigma S_{OT}}{E_0 (1 - S_{OT}) + E_1 S_{OT}} \quad (28)$$

Полученное уравнение, для определения ξ_z , подставляем в начальные условия (20) и (21), для определения напряжений, действующих в сухом и увлажнённом угле соответственно.

Для сухого угля

$$P_z = \frac{[P_\Gamma - 2\mu_1 \sigma S_{OT} + 2\mu_0 P E_{OT} S_{OT}]}{(1 - S_{OT}) + E_{OT} S_{OT}} \quad (29)$$

На данном этапе выполнения работы мы, в силу сложности задачи, не учитываем возможную разгрузку влажной части пласта от горизонтальных контактных напряжений и принимаем

$$P_x = \sigma_x; \quad (30)$$

$$P_y = \sigma_y; \quad (31)$$

С учетом этого и подстановки относительных величин (25) и (27), получим, после перегруппировки слагаемых в знаменателе правой части, окончательное выражение для величины $P_{z.om}$, выражающей отношение вертикальной нагрузки в увлажненной части пласта к исходному горному давлению

$$P_{z.om} = \frac{1 - 2\mu_1 P_{OT} S_{OT} + 2\mu_0 P_{OT} E_{OT} S_{OT}}{(1 - S_{OT}) + (1 - E_{OT})} \quad (32)$$

Напряжения σ_z в увлажнённом угле определим по формулам (21, 28)

$$\sigma_z = \frac{E_1 P_T - 2\mu_0 P(1 - S_{OT}) - 2\mu_1 \sigma S_{OT} + 2\mu_1 \sigma (E_0(1 - S_{OT}) + E_1 S_{OT})}{E_0(1 - S_{OT}) + E_1 S_{OT}}$$

Подставив в последнее выражение относительную величину (23), получим

$$\sigma_z = \frac{E_{OT}(P_T - 2\mu_0 P(1 - S_{OT}) - 2\mu_1 \sigma S_{OT}) + 2\mu_1 \sigma ((1 - S_{OT}) + E_{OT} S_{OT})}{1 - S_{OT} + E_{OT} S_{OT}}$$

Переходя к относительным величинам по формулам (26) и (27) и учитывая (30, 31), получим

$$\sigma_{z,OT} = \frac{E_{OT}(1 - 2\mu_0 P_{OT}(1 - S_{OT}) - 2\mu_1 P_{OT} S_{OT}) + 2\mu_1 P_{OT}((1 - S_{OT}) + E_{OT} S_{OT})}{1 - S_{OT} + E_{OT} S_{OT}} \quad (33)$$

Соотношения (32, 33) позволяют анализировать зависимость напряжений от модуля упругости влажного угля. Для построения зависимости напряжений непосредственно от уровня влажности были использованы экспериментальные данные работы [2].

Сами напряжения (32)- (33) зависят не только от модуля упругости, определяемого влажностью угля W , но и от соотношения площадей влажного и сухого угля S_{om} , а также от отношения бокового давления в пласте к горному давлению P_{om} .

На рисунке 5 представлены зависимости вертикальных относительных напряжений для влажного ($\sigma_{z,om}$) и сухого угля ($P_{z,om}$) от относительной площади увлажнения S_{om} , при отсутствии бокового давления ($P_{om} = 0$) и разных значениях влажности W .

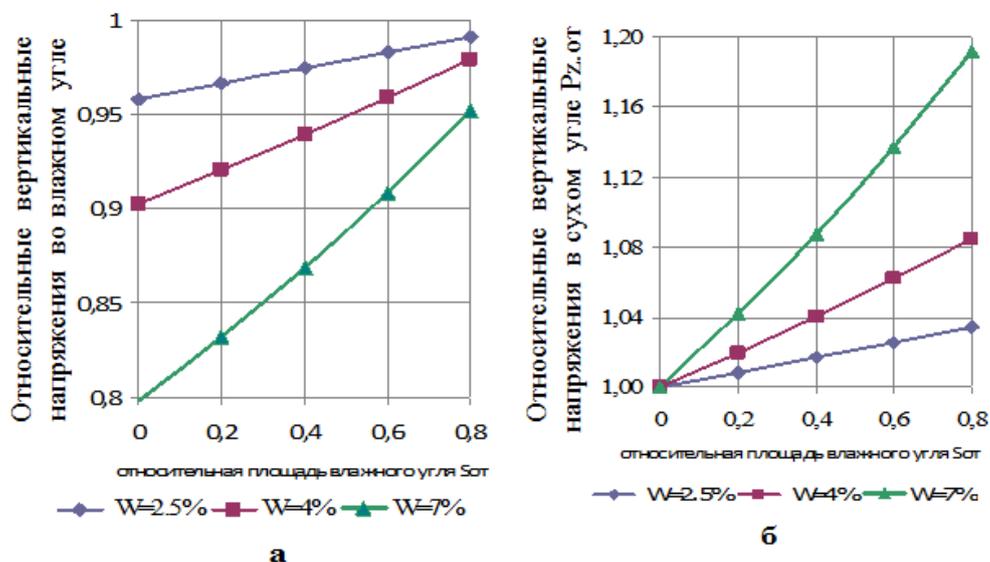


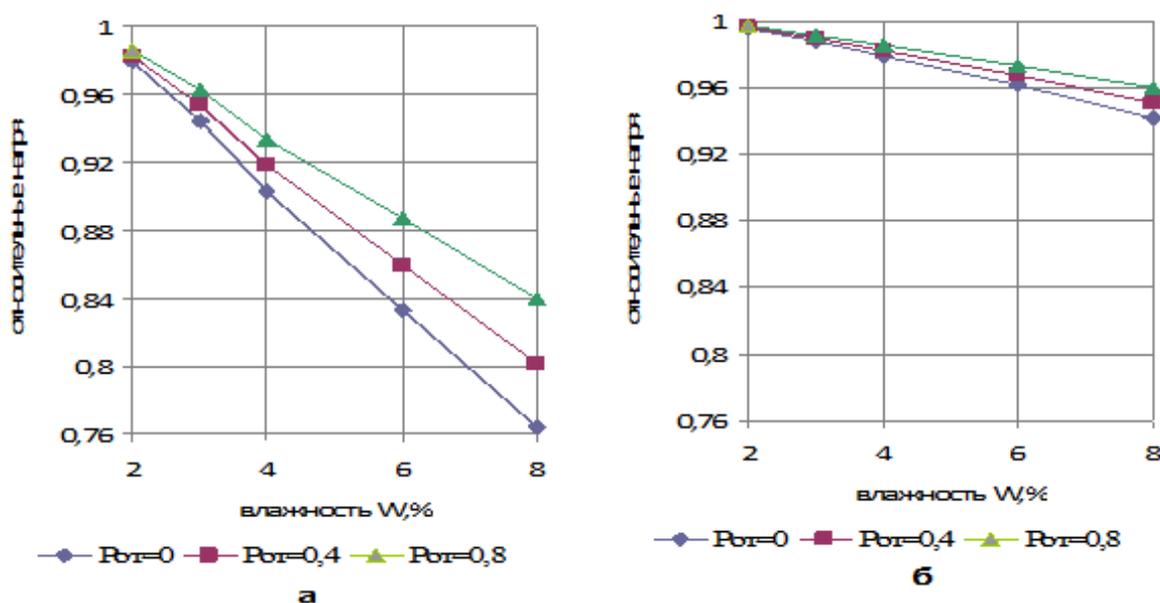
Рисунок 5– Зависимость вертикальных относительных напряжений от относительной площади увлажнения при разных значениях влажности угля W без бокового давления в пласте

На первый взгляд линейная восходящая зависимость вертикальных напряжений влажного угля от площади увлажнения, представленная на левом рисунке 5-а, имеет парадоксальный характер. Ведь наибольшая разгрузка влажного угля достигается тогда, когда его площадь стремится к 0, а с увеличением площади увлажнения степень разгрузки уменьшается.

Но, на самом деле, парадокса здесь нет. При малой площади увлажнения всю нагрузку от кровли воспринимает сухой уголь, площадь которого только чуть-чуть меньше первоначальной. Поэтому, напряжения в сухом угле $P_{z.om}$ практически не увеличиваются, о чем свидетельствует точка $S_{om} = 0$ на графиках правого рисунка 5-б. И дополнительного смещения кровли, как единого жесткого целого, практически не происходит. Т.е. расстояние между кровлей и почвой пласта на увлажненном участке (весьма малой площади) не изменяется, а его модуль упругости падает, вызывая максимальное падение вертикального напряжения $\sigma_{z.om}$ для точки $S_{om} = 0$ на графиках рисунка 5-а. При уменьшении площади сухого угля вертикальные напряжения в нем увеличиваются и вызывают заметный рост дополнительной вертикальной деформации, которая передается на влажный уголь и вызывает в нем дополнительные напряжения [5]. В пределе, когда весь уголь увлажнен, т.е. $S_{om} = 1$, напряжения в нем снова станут такими же, как были в образце до начала увлажнения, поскольку горное давление от кровли осталось прежним.

Зависимости на рисунке 5 получены при отсутствии бокового давления.

На рисунке 6 представлены зависимости относительных напряжений ($\sigma_{z.om}$) от влажности угля W при разных значениях бокового давления P_{om} , позволяющие оценить его влияние.



а) – относительная площадь увлажнения $S_{om} = 0$;

б) – относительная площадь увлажнения $S_{om} = 0,8$

Рисунок 6 – Зависимость вертикальных относительных напряжений $\sigma_{z.om}$ от влажности угля W при разных значениях бокового давления P_{om}

Наибольшее влияние боковое давление оказывает при малой относительной площади увлажнения S_{om} и при высокой влажности угля. Однако и в этих условиях его влияние гораздо меньше, чем влияние самой влажности. Рисунок 6-а показывает, что при площади увлажнения $S_{om} = 0$ и максимальной влажности $W = 8\%$ вертикальные напряжения $\sigma_{z.om}$ при отсутствии бокового давления всего на 10% меньше, чем при боковом давлении $P = 0,8P_c$. А при большой площади увлажнения эта разница сокращается до 2%, о чем свидетельствует рисунок 6 б. Поэтому, вертикальные напряжения можно рассчитывать для среднего значения бокового давления $P = 0,4P_c$, или $P_{om} = 0,4P_c$ с максимальной погрешностью не более $\pm 5\%$.

Для формирования выводов о возможности деформационной разгрузки пласта поведем оценку влажности и средней относительной площади увлажнения на основании данных натуральных экспериментов по гидрорыхлению угля [6-8]. В среднем, объем воды, поданной в пласт во время гидрорыхления, составляет 20 л/т угля. Из этой цифры легко получить средний прирост влажности. Будем считать, что плотность угля равна $1,5 \text{ т/м}^3$. Тогда, объем, занимаемый 1 тонной составит $(1/1,5) \text{ м}^3$. В процессе гидрорыхления в этот объем подано 20 л. Влажность определяется как объем воды в 1 м^3 угля, поэтому прирост влажности составит $20 \cdot 10^{-3} / (1/1,5) = 3\%$.

Если считать, что влага распределяется в угле равномерно, то относительные вертикальные напряжения нужно оценивать при влажности 3 %.

В этом случае идеально равномерной коллекторной структуры пласта эффект деформационной разгрузки практически не проявляется. Даже при весьма малой относительной площади увлажнения $S_{om} = 0$ и влажности 3 % вертикальные напряжения, определяемые рисунком 6-а, снижаются всего на 5 %.

Однако, реальный пласт не обладает идеально равномерной коллекторной структурой [4]. Вода в нем распределяется весьма неравномерно. И для него, в первом приближении можно использовать модель, в которой элементы с максимальной влажностью соседствуют с практически сухими элементами, заполненными законсервированным газом.

Будем считать, что максимальная влажность равна $W_{max} = 8\%$, а прирост влажности, усредненный по всему объему пласта составляет, по-прежнему, $W_{cp} = 3\%$. Из этих данных можно найти относительную поверхность увлажнения по формуле

$$W_{max} S_{om} = W_{cp}$$

$$S_{om} = W_{cp} / W_{max} \quad (34)$$

Полученная формула показывает, что даже при полной гидрообработке газонасыщенного пласта с не равномерно распределенными коллекторными свойствами, относительная площадь увлажнения не поднимается выше значения $S_{om} = 0,4$.

Обращаясь к рисунку 5-а найдем, что разгрузка влажных участков пласта, определяемая по кривой для $W = 7\%$ при $S_{om} = 0,4$, составляет примерно 13 %.

При этом пригрузка сухих участков, определяемая по рисунку 5-б составляет 8 %.

Если пласт обработан не полностью, а частично, то относительная площадь увлажнения будет еще меньше, а разгрузка влажных участков – больше, достигая в пределе 20 % при $S_{om} = 0$. При этом пригрузка сухих участков будет уменьшаться до нуля.

Выводы. Увеличение смещений во влажной зоне при одновременном снижении действующих в ней напряжений является важной особенностью процесса деформационной разгрузки увлажненного массива, отличающим его от силовой разгрузки. При силовой разгрузке снижение внешней нагрузки сопровождается снижением смещений внутри массива. В этом легко убедиться, анализируя выражения (7) и (9).

При расчете несущей способности увлажненного массива внешнюю нагрузку на него нужно уменьшать на величину деформационной разгрузки, составляющей 10 % при диаметре контура увлажнения меньшем мощности пласта, и до 20 % при диаметре контура увлажнения большем мощности пласта.

При этом, с ростом относительной площади увлажнения наблюдается тенденция снижения величины деформационной разгрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сопrotивление материалов / Г.С. Писаренко, В.А. Асарев, А.Л. Квитка [и др.]. – изд. 5, перераб. и доп. - Киев: „Вища школа“, 1986. – 696с.
2. Повышение эффективности гидрорыхления выбросоопасных угольных пластов / С.П. Минеев, А.А. Потапенко, Т.Я. Мхватовари [и др.]. – Донецк: Східний видавничий дім, 2013. – 216 с.
3. Модель предельного состояния угольного пласта при нагнетании жидкости / В.В. Зберовский, Ю.Е. Поляков, А.В. Пазынич [и др.] // Збірник наукових праць НГУ. – Днепропетровск: НГУ, 2011. - № 36, Том № 1. – С. 194-199.
4. Минеев, С.П. Свойства газонасыщенного угля / С.П. Минеев. – Днепропетровск: НГУ, 2009.– 220 с.
5. Зорин, А. Н. Управление динамическими проявлениями горного давления / А.Н. Зорин. - М. : Недра, 1978. – 216 с.
6. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – Киев: Наукова думка, 1989 – 192 с.
7. Кияшко, Ю. И. Закономерности разрушения угольного вещества за традиционно определяемыми пределами прочности / Ю.И. Кияшко, Р.А. Дякун / Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: XVII Межд. Науч. Школы / ТНУ. – Симферополь, 2007. – с 134-136.
8. Система уголь-газ в углеводородах угольного генезиса / В.В. Соболев, А.С. Поляшов, В.В. Зберовский [и др.]. - Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2013. - 246 с.

REERENCES

- 1 Pisarenko, G.S., Asarev, V.A., Kvitka A.L. (1986), *Soprotivlenie Materialov* [Strength of materials], Edition 5, Vyshcha shkola, Kiev, USSR.
2. Mineev, S.P., Potapenko, A.A., Mhvatvari, T.Ya., et al. (2013), *Povyshenie effektivnosti gidrorykhlenniya vybrosopasnykh ugolnykh plastov* [Improving the efficiency of hydro breaking on outburst coal seams], Shidnyi vydavnychiy dim, Donetsk, Ukraine.
- 3 Zberovskiy, V.V., Pazynich, A.V., Polyakov, Yu.E., Potapenko, A.A. and Angelovskiy, A.A. (2011), “The model of a limiting condition of the coal seam at the liquid injection”, *Scientific Collected Works of NMU*, no. 36, vol. № 1, pp. 194-199.
4. Mineev, S.P. (2009), *Svoystva gazonasyshhenogo uglya*, [Properties of gas-saturated coal], Dnepropetrovsk, NMU, Ukraine.

5. Zorin, A.N. (1978), *Upravlenie dinamicheskimi proyavleniyami gornogo davleniya* [Control of dynamic manifestations of rock pressure], Nedra, Moscow, USSR.
6. Vinogradov, V.V. (1989), *Geomekhanika upravleniya sostoyaniem massiva vblizi gornykh vyrabotok* [Geomechanics control of the array state near mine workings], Naukova Dumka, Kiev, USSR.
7. Kiyashko, Yu. I. and Dyakun, R. A. (2007), "Legitimacies the destruction of the coal matter by the traditional definition of strength", *Trudy XVII Mezhdunarodnoy Nauchnoy Sholy* [Proceedings XVII of the International Scientific School], *Deformirovanie i razrushenie materialov s defektami i dinamicheskie yavleniya v gornykh porodakh i vyrabotkakh* [Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and workings], Simferopol, Ukraine, pp. 134-136.
8. Sobolev, V.V., Polashov, A.S., Zberovskiy, V.V., Angelovskiy, A.A., Chugunkov, I.F. (2013), *Monografiya, Sistema ugol-gaz v uglevodorodah ugolnogo genezisa* [The monograph System coal-gas hydrocarbon genesis of coal], ART-PRESS, 246 p.

Об авторе

Поляков Юрий Евгеньевич, магистр, младший научный сотрудник в отделе Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, ZoRTFA@mail.ru.

About the author

Polyakov Yuriy Evgenevich, Master of Sciences (M.S.), Junior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine., ZoRTFA@mail.ru

Анотація. У наведеній статті розглядається розвантаження пласта, який не перебуває в гранично напруженому стані. Приймається, що несуча здатність пласта, навіть знижена через водонасичення, все ж перевершує гірничий тиск. Як фактор розвантаження виступає зниження модуля пружності з підвищенням вологості вугілля. Вважається, що деформації ξ_x , ξ_y , ξ_z в сухому і зволоженому вугіллі однакові. При малій площі зволоження все навантаження від покрівлі сприймає сухе вугілля, площа якого тільки трохи менше первісної. При зменшенні площі сухого вугілля вертикальні напруги в ньому збільшуються і викликають помітне зростання додаткової вертикальної деформації, яка передається на вологе вугілля і викликає в ньому додаткове напруження. Зменшення міцності вологого вугілля є головним фактором, що визначає ступінь розвантаження від гірського тиску крайової частини пласта при гідророзпушуванні.

Ключові слова: гідросилова, модуль пружності, деформаційне розвантаження, вологість вугілля, межа міцності, гідророзпушування, площа зволоження.

Abstract. In this article, a problem of unloading a coal seam, which is not in extremely stressed state, is considered. It is assumed that bearing capacity of the coal seam, even decreased due to water saturation, exceeds the rock pressure. It is further assumed that an unloading factor is the elastic modulus decrease with increased coal humidity. It is believed that the ξ_x , ξ_y , ξ_z deformations of the dry and wet coal are the same. When a wet area is small, a total load of the roof is taken by the dry coal, whose area is only slightly smaller than the original one. With the dry coal area decreasing, vertical stress therein increases and causes a significant additional increase of vertical deformation, which is transferred to the wet coal and causes additional stresses. Decreased strength of the wet coal is a main factor, which determines a rate of the buttock unloading from the rock pressure in the process of the rock hydraulic breaking.

Keywords: hydraulic power, elastic modulus, deformation unloading, coal humidity, strength limit, hydraulic breaking, humidification area.

Статья поступила в редакцию 15.11.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Минеевым С.П.