

national scientific-practical conference “School Underground Mining - 2013” / “Mining of Mineral Deposits”. – Netherlands: CRC Press / Balkema. – P. 211-217.

3. Фомичов В.В. Математичні методи моделювання взаємодії кріплення та гірського масиву при вирішенні задач геомеханіки / Фомичов В.В., Лапко В.В., Мамайкин О.Р // Геотехнічна механіка ІГТМ ім. М.С. Полякова, – 2011. – Вип. 94. – С. 116-121.
4. Вивчаренко В.А. Обоснование рационального месторасположения надрабатываемых выработок на шахтах Западного Донбасса / Вивчаренко В.А., Соцков В.А./ Уголь Украины. 2015 №1-2. С.13-17.

*Рекомендована до публікації д.т.н.. Бондаренком В. І.
Надійшла до редакції 27.10.2014*

УДК 539.3:622.831.322

© А.Р. Сницер, В.В. Зберовский

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ СКВАЖИНЫ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГНЕТАНИИ ЖИДКОСТИ

Рассматривается задача о распределении напряжений вокруг скважины, пробуренной в угольном пласте, при гидроимпульсном воздействии. Напряжения определяются на основе решения динамической и статической краевых задач теории упругости. Представлены зависимости изменения напряжений от свойств угля, расстояния от оси скважины и частоты следования импульсов давления при нагнетании жидкости. Оценено влияние коэффициента бокового давления, границ кровли и почвы пласта на развитие, распределение и концентрацию напряжений в угольном пласте вокруг скважины.

Розглядається задача про розподіл напружень навколо свердловини, пробуреної в вугільному пласті, при гідроімпульсними впливі. Напруження визначаються на основі рішення динамічної та статичної крайових задач теорії пружності. Представлені залежності зміни напружень від властивостей вугілля, відстані від осі свердловини і частоти проходження імпульсів тиску при нагнітанні рідини. Оцінено вплив коефіцієнта бокового тиску, кордонів покрівлі і ґрунту пласта на розвиток, розподіл і концентрацію напружень у вугільному пласті навколо свердловини.

The problem of tensions distribution round the mining borehole in a coalbed at hydroimpuls pressure pumping is examined. Tensions are determined on the basis of decision of dynamic and static boundary problems of the theory of elasticity. Dependences of changes of tensions on properties of coal, distances from an axis of mining borehole and frequencies of the following of impulses of pressure at fluid pumping are represented. Influence of lateral pressure coefficient, boundaries of roof and soil of coalbed on development, distribution and concentration of tensions around a borehole in the coalbed are appraised.

Введение. Решение частных задач, в которых исследовались напряжения вокруг скважины в рамках теории упругости, приведено в работах [1-4].

До настоящего времени малоисследованным остается процесс передачи импульсов давления углепородному массиву в фильтрационной части скважины при гидроимпульсном воздействии. Не исследовано влияние импульсов

давления жидкости на изменение радиальных и максимальных напряжений, возникающих вокруг скважины в угольном пласте, находящемся в поле горного давления при нагнетании жидкости. Важным является исследование распределения напряжений вокруг скважины и точки максимальной их концентрации в зависимости от коэффициента бокового горного давления, параметров угольного пласта, частоты следования импульсов давления, и влияние границы «угольный пласт-вмещающие породы». Данные аспекты изучения напряженного состояния вокруг скважины в угольном пласте при импульсном нагнетании жидкости и являются целью данной статьи.

1. *Напряжения вокруг горизонтальной скважины в угольном пласте.*

При исследовании напряженного состояния вокруг горизонтальной скважины в неограниченном угольном массиве при импульсном нагнетании жидкости будем исходить из следующих допущений.

1. Угольный массив является однородной сплошной упругой средой.

2. Фильтрационные процессы, происходящие вокруг скважины, не учитываются, движение жидкости происходит за счет неограниченной протяженности скважины.

3. На поверхности скважины: гармонически зависящие от времени импульсы давления, размах и частота их следования, а также постоянная составляющая давления определяются техническими характеристиками устройства гидроимпульсного воздействия.

При данных допущениях, задача определения напряженного состояния вокруг скважины при импульсном нагнетании жидкости сводится к статической и динамической краевым задачам теории упругости.

Напряжения вокруг горизонтальной скважины, находящейся на глубине H , при импульсном нагнетании жидкости определяются суммой составляющих $\hat{\sigma}^{(\gamma H)}$, связанной с горным давлением и $\hat{\sigma}^{(Hidro)}$, порождаемой давлением жидкости:

$$\hat{\sigma} = \hat{\sigma}^{(\gamma H)} + \hat{\sigma}^{(Hidro)} \quad (1)$$

Напряжения, обусловленные весом вышележащих горных пород определяются известным решением плоской задачи о сжатии упругой плоскости с круговым отверстием свободным от напряжений [1,2]:

$$\sigma_{rr}^{(\gamma H)}(r) = -\frac{\gamma H}{2} \left[(1 + \lambda) \left(1 - a^2 / r^2 \right) + (1 - \lambda) \left(1 - 4a^2 / r^2 + 3a^4 / r^4 \right) \cos(2\vartheta) \right], \quad (2)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(\gamma H)}(r) = -\frac{\gamma H}{2} \left[(1 + \lambda) \left(1 + a^2 / r^2 \right) - (1 - \lambda) \left(1 + 3a^4 / r^4 \right) \cos(2\vartheta) \right], \quad (3)$$

$$\tau_{r\theta}^{(\gamma H)}(r) = \frac{\gamma H}{2} (1 - \lambda) \left(1 + 2a^2 / r^2 - 3a^4 / r^4 \right) \sin(2\vartheta), \quad (4)$$

где: γH – горное давление; a – радиус скважины; r, ϑ – радиальная и угловая переменные в полярной системе координата; λ – коэффициент бокового давления в массиве.

Напряжения, вызванные нагнетанием жидкости в скважину, определяются статической p_{st} и динамической p_{din} составляющими импульса давления:

$$p = p_{st} + p_{din} \quad (5)$$

$$p_{st} = \bar{p} = (p_{\max} + p_{\min}) / 2, \quad p_{din} = 0.5 \Delta p \cos(\omega t), \quad \Delta p = p_{\max} - p_{\min} \quad (6)$$

В силу представления давления нагнетаемой жидкости в виде (5), расчет возникающих при этом радиальных напряжений сводится к линейной суперпозиции решений двух известных краевых задач теории упругости. Статическая составляющая определяется решением Ламе задачи об осесимметричном нагружении кругового отверстия в бесконечной упругой пластине [3]:

$$\sigma_{rr}^{(st)}(r) = (a^2 / r^2) p_{st}, \quad (7)$$

а динамическая составляющая – решением задачи о гармоническом нагружении поверхности скважины в неограниченной упругой среде [3,4]:

$$\sigma_{rr}^{(din)}(r) = -0.5 \Delta p \frac{2br^{-1} H_1^{(2)}(k_1 r) - k_1 H_0^{(2)}(k_1 r)}{2b a^{-1} H_1^{(2)}(k_1 a) - k_1 H_0^{(2)}(k_1 a)}, \quad (8)$$

где $H_n^{(2)}(k_1 r)$ – функции Ханкеля, $k_1 = 2\pi f \sqrt{\rho(1+\nu)(1-2\nu) / E(1-\nu)}$ – волновое число продольных волн, ρ – плотность массива, ν – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости, f – частота гармонического воздействия на поверхность скважины, $b = (1-2\nu) / 2(1-\nu)$.

Выражения (7) и (8) записаны в полярной системе координат. Заметим, что нагнетаемая в скважину жидкость оказывает давление по нормали к ее поверхности, поэтому вклад в изменение напряженного состояния в массиве дают только радиальные компоненты тензора напряжений, т.е. – (7), (8).

Учитывая гармоническую зависимость динамической составляющей давления от времени и используя выражения (7), (8), результирующее значение радиальной компоненты $\sigma_{rr}^{(Hidro)}(r, t)$ тензора напряжений вокруг скважины можно записать в виде:

$$\sigma_{rr}^{(Hidro)}(r, t) = \frac{a^2}{r^2} p_{st} + 0.5 \Delta p \frac{\left| (2b/r) H_1^{(2)}(k_1 r) - k_1 H_0^{(2)}(k_1 r) \right|}{\left| (2b/a) H_1^{(2)}(k_1 a) - k_1 H_0^{(2)}(k_1 a) \right|} \cos(\omega t). \quad (9)$$

Были рассчитаны распределения радиальных напряжений вокруг скважины, обусловленные только горным давлением $\sigma_{rr}^{(\gamma H)}(r)$, и в случае возникающего дополнительного напряжения $\sigma_{rr}^{(Hydro)}(r,t)$ при гидроимпульсном воздействии. Расчеты проводились при следующих параметрах: $f=7$ кГц – частота импульсов автоколебаний давления; $\gamma H=-20$ МПа (отрицательные напряжения считаются сжимающими, а положительные – растягивающими); $\lambda=0.5$ – коэффициент бокового давления; $\nu=0,2$; $E=400$ МПа; $a=0,025$ м; $p_{\max}=15$ МПа – максимальное и $p_{\min}=5$ МПа – минимальное значения импульса давления жидкости при выходе из генератора; внутреннее трение не учитывается.

На рис. 1 представлены изолинии радиальных напряжений вокруг горизонтальной скважины на глубине H от земной поверхности в случае полой скважины и при гидроимпульсном нагнетании жидкости. Изолинии уровня напряжений изображены в декартовой системе координат с началом в центре скважины. По горизонтальным и вертикальным осям указаны значения координат в метрах. Числа на изолиниях имеют размерность МПа.

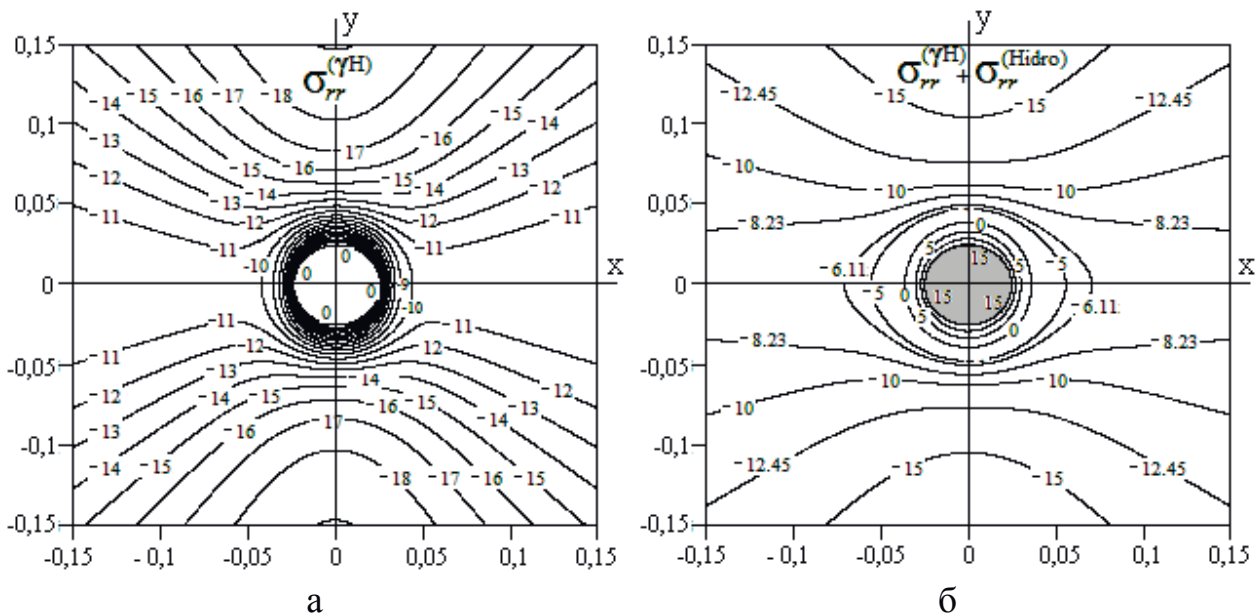


Рис. 1. Распределение радиальных напряжений вокруг скважины: а) полая скважина в поле горного давления; б) скважина при импульсном нагнетании жидкости

Из рис. 1а видно, что на поверхности скважины радиальные напряжения отсутствуют, и по мере удаления от ее центра вдоль вертикальной оси, являясь отрицательными (сжимающими) возрастают по модулю (стремясь вдали от нее к горному давлению γH непрерывного массива). При удалении от центра скважины вдоль горизонтальной оси радиальные напряжения стремятся к величине $\lambda(\gamma H) = -10$ МПа. На рис. 1б изображены линии уровня значений радиальных напряжений ($\cos \omega t = 1$) с учетом гидроимпульсного давления жидкости. В

этом случае благодаря давлению жидкости радиальное напряжение на поверхности скважины становится растягивающим (положительным) равным 15 МПа. По мере удаления от оси скважины оно убывает до нуля и далее по вертикальному направлению устремляется к сжимающему горному давлению в сплошной породе, а по горизонтальному – к величине $\lambda(\gamma H) = -10\text{МПа}$.

Как следует из формул (1), (2), (9), на поверхности скважины ($r = a$) радиальные напряжения не зависят от угла ϑ . Таким образом, радиальные компоненты напряжения на поверхности полой скважины отличаются от таковых при гидроимпульсном воздействии на величину $\sigma_{rr}^{(Hidro)}(a)$. Максимальные напряжения вокруг горизонтальной скважины в поле горного давления определяет выражение [1]:

$$\sigma_{\max} = (\sigma_{rr} + \sigma_{\vartheta\vartheta})/2 - \sqrt{[(\sigma_{rr} - \sigma_{\vartheta\vartheta})/2]^2 + \tau_{r,\vartheta}^2} \quad (10)$$

С целью оценки влияния гидроимпульсного воздействия на напряженное состояние углепородного массива по формуле (10) были просчитаны максимальные по модулю напряжения вокруг скважины в двух случаях: обусловленные только горным давлением и в случае гидроимпульсного воздействия. Для расчетов использовались указанные выше параметры. В первом случае, в качестве компонент тензора напряжений использовались формулы (2)-(4), определяющие горное давление, во втором случае к радиальной компоненте (2) тензора напряжений прибавлялась радиальная компонента (9), возникающая при импульсном нагнетании жидкости в скважину. При этом компоненты (3), (4) тензора напряжений, связанные с горным давлением, не изменяются.

На рис. 2 представлены изолинии максимальных напряжений вокруг горизонтальной скважины на глубине H от земной поверхности в случае полой скважины и при импульсном нагнетании жидкости.

В отличие от радиальных компонент напряжений (рис. 1), распределение максимальных напряжений на поверхности скважины зависит от полярного угла ϑ . Нетрудно показать, что в рассмотренных двух случаях при $r = a$ выражение (10) приобретает вид:

$$\sigma_{\max}(a) = \frac{1}{2} [\sigma_{\vartheta\vartheta}(a) - |\sigma_{\vartheta\vartheta}(a)|], \quad \sigma_{\vartheta\vartheta}(a) = -\gamma H [(1 + \lambda) - 2(1 - \lambda)\cos(2\vartheta)] \quad (11)$$

$$\sigma_{\vartheta\vartheta}(a, \vartheta) \Big|_{\lambda=0.5} = -0.5\gamma H [3 - 2\cos(2\vartheta)], \quad (12)$$

откуда очевидно, что $\sigma_{\vartheta\vartheta}(a, \vartheta) < 0$, и тогда:

$$\sigma_{\max}(a, \vartheta) = \sigma_{\vartheta\vartheta}(a, \vartheta) \Big|_{\lambda=0.5} \cdot \quad (13)$$

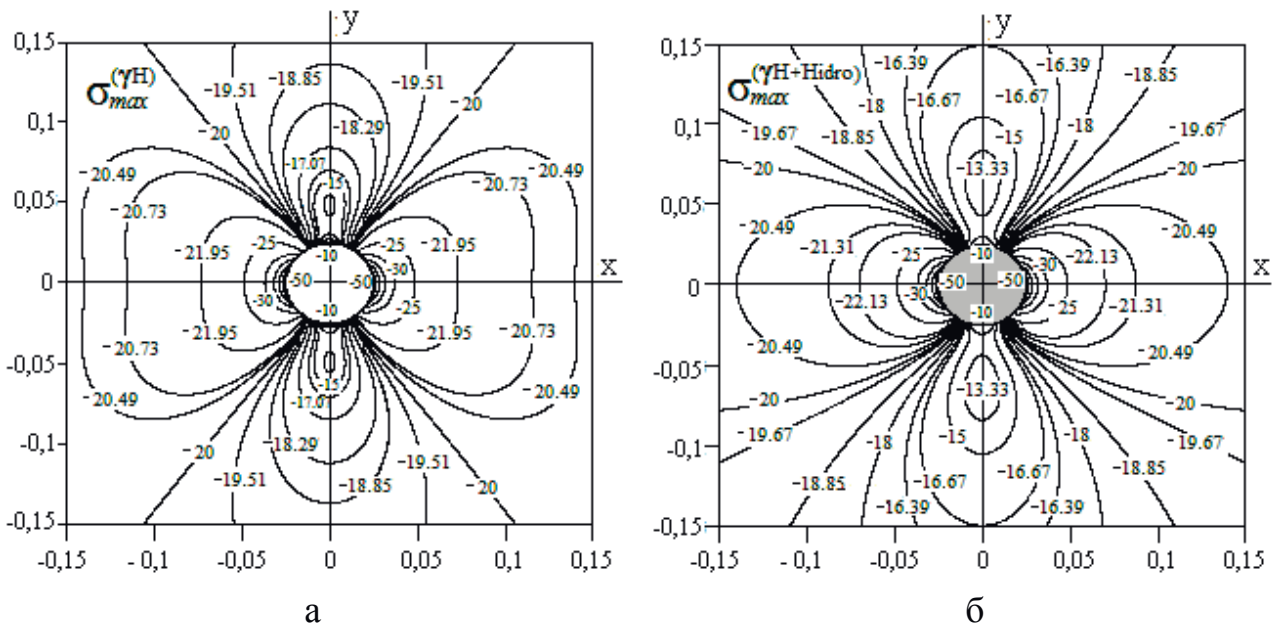


Рис. 2. Распределение максимальных (по модулю) напряжений вокруг скважины: а) полая скважина в поле горного давления; б) скважина при импульсном нагнетании жидкости

Из (11) следует, что максимальные напряжения на поверхности скважины, определяемые только тангенциальной компонентой (3) порождаемой горным давлением, не зависят от импульсного давления создающего лишь радиальные напряжения. Также из (11)-(13) видно, что максимальные напряжения $\sigma_{max}(a)$ зависят от величин γH , λ , и угловой координаты ϑ (отсчитывается от положительного направления оси O_y против часовой стрелки). Из (12) получим максимальные и минимальные по абсолютной величине напряжения на поверхности скважины: $\sigma_{\vartheta\vartheta}(a, \pi/2)|_{\lambda=0.5} = \sigma_{\vartheta\vartheta}(a, 3\pi/2)|_{\lambda=0.5} = -50 \text{ МПа}$, при коэффициенте концентрации напряжений $K_\sigma = 2,5$, и $\sigma_{\vartheta\vartheta}(a, 0)|_{\lambda=0.5} = \sigma_{\vartheta\vartheta}(a, \pi)|_{\lambda=0.5} = -10 \text{ МПа}$, при коэффициенте концентрации напряжений $K_\sigma = 0,5$. Заметим, что направления $\vartheta = 0, \pi$ и $\vartheta = \pi/2, 3\pi/2$ соответствуют направлениям главных напряжений т.к. в этом случае компонента (4) – $\tau_{r\theta}^{(\gamma H)}$ обращается в ноль.

На рис. 3а представлены зависимости радиальных напряжений от расстояния до оси полой скважины – (кривые 1, 3) и скважины при импульсном нагнетании жидкости – (кривые 2, 4).

Из выражения (2) очевидно, что при $\lambda \neq 1$ радиальные напряжения зависят не только от r , но и от угла ϑ (между вертикальной осью и радиальным направлением). Так при движении по радиальным направлениям $\vartheta = 0, \pi$ при удалении от скважины напряжения $\sigma_{rr}^{(\gamma H)}(r)$ и $\sigma_{rr}^{(\gamma H)}(r) + \sigma_{rr}^{(Hidro)}(r)$ устремляются к значению горного давления $\gamma H = -20 \text{ МПа}$ (кривые 1,2), а по направлениям $\vartheta = \pm\pi/2$ – к значению горного давления $\lambda(\gamma H) = -10 \text{ МПа}$ (кривые 3,4).

При этом гидроимпульсная добавка к напряжению не зависит от угла ϑ , что следует из выражения (8) и видно при сравнении кривых 1-4.

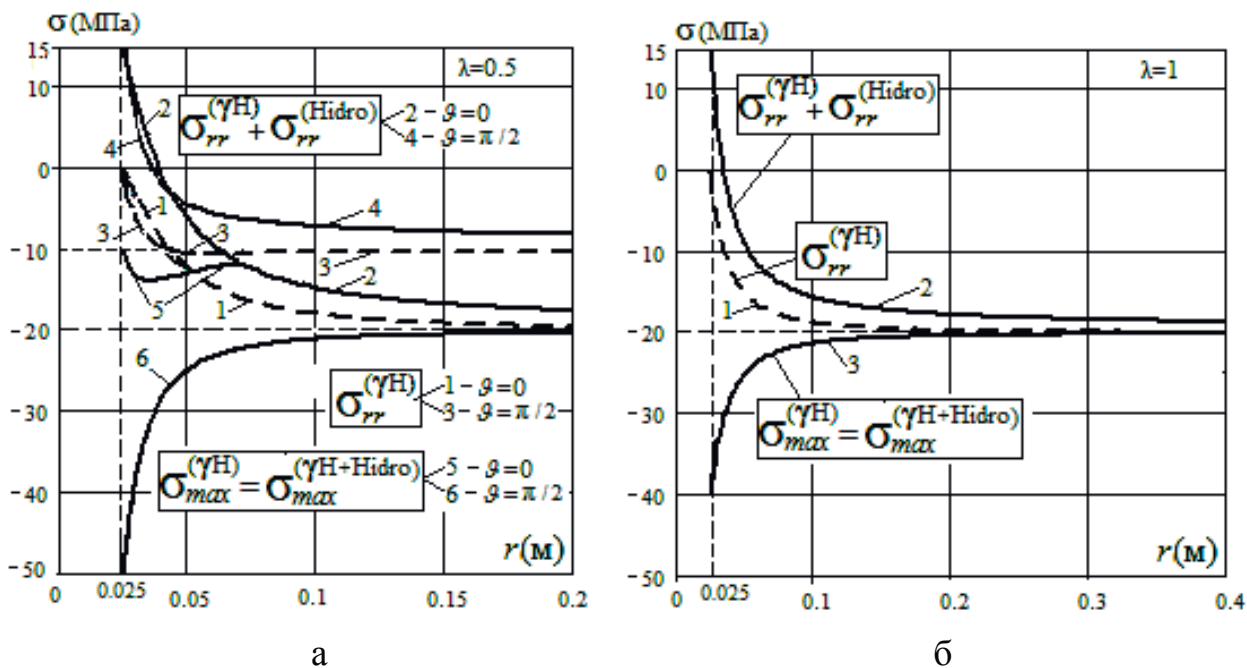


Рис. 3. Зависимости напряжений от радиального расстояния до оси скважины для различных коэффициентов бокового давления в массиве: а) $\lambda = 0.5$; б) $\lambda = 1$

Кривые 5, 6 отображающие радиальные зависимости максимальных напряжений (10) по направлениям $\vartheta = 0, \pi$ и $\vartheta = \pm\pi/2$ существенно отличаются, что связано с большой разницей коэффициента концентрации напряжений на поверхности скважины. Как следует из проведенных расчетов, импульсное давления жидкости не изменяет максимальное напряжение не только на поверхности скважины, как это показано в (11)-(13), но и на радиальных расстояниях по указанным направлениям. В случае коэффициента бокового давления $\lambda = 1$, линии равного уровня напряжений вокруг скважины представляют концентрические окружности. Выражения для радиальных и максимальных напряжений в этом случае не зависят от угла ϑ и приобретают вид:

$$\sigma_{rr}^{(\gamma H)}(r) = -|\gamma H| \left(1 - a^2 / r^2\right) \quad (14)$$

$$\sigma_{\max}(r) = \sigma_{\theta\theta}^{(\gamma H)}(r) = -|\gamma H| \left(1 + a^2 / r^2\right). \quad (15)$$

Соответствующие зависимости радиальных и максимальных напряжений от расстояния до оси полости представлены на рис. 3 б кривыми 1-3. Из рисунка видно, что гидроимпульсное воздействие на скважину изменяет только радиальные напряжения вокруг скважины, компенсируя в её окрестности сжимающие напряжения, обусловленные горным давлением.

На рис. 4 представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) динамической составляющей радиальных напряжений, посчитанные при различных коэффициентах Пуассона (рис.4 а) и для различных коэффициентов внутреннего трения (рис. 4 б). Из рис. 4 а видно что, с ростом коэффициента Пуассона ν , составляющая $|\sigma_{rr}^{(din)}|$ радиальных напряжений увеличивается во всем рассмотренном диапазоне частот $f = 0 \div 25$ кГц, причем наибольшее увеличение происходит на интервале $f = 7 \div 15$ кГц. Приведенные на рис. 4 а АЧХ просчитаны на расстоянии $r=2a=0,05$ м от оси скважины в отсутствие внутреннего трения и при указанных выше прочих параметрах.

Для изучения влияния диссипации на АЧХ динамических напряжений, посредством замены вещественного модуля сдвига μ на комплексный $\hat{\mu} = \mu e^{i\gamma}$, и использования формальной связи $\mu = E/2(1 + \nu)$, вводился коэффициент внутреннего трения γ .

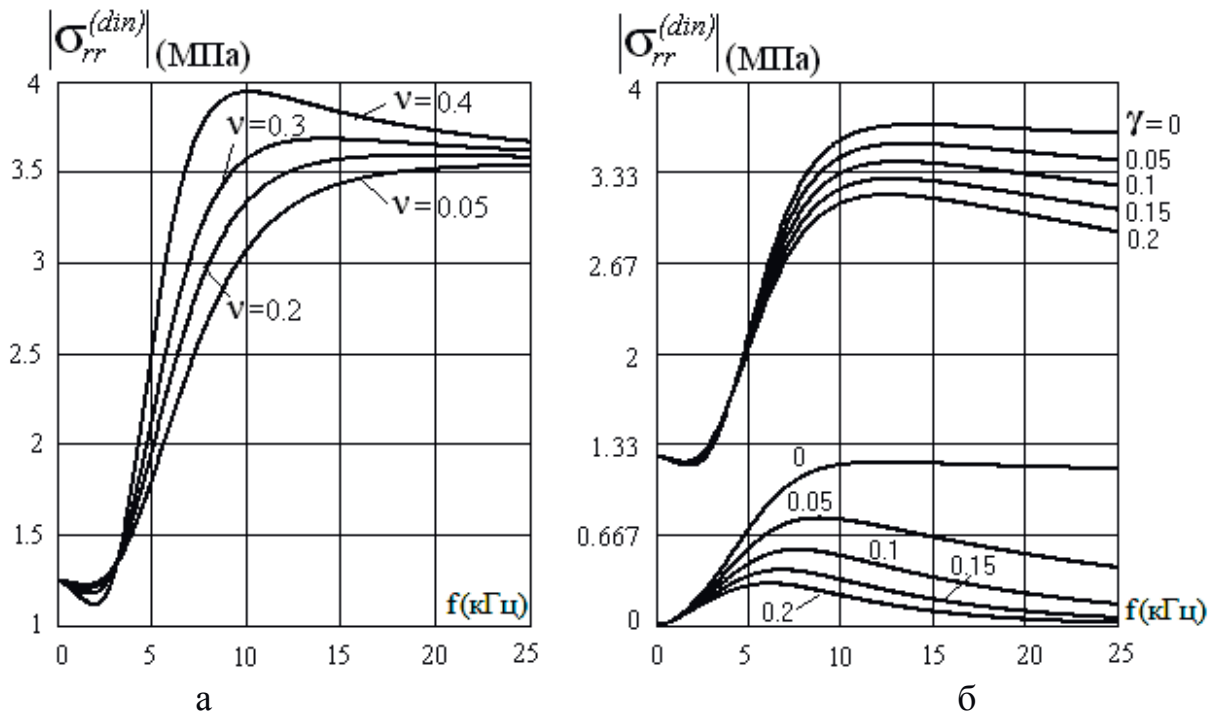


Рис. 4. Частотные зависимости динамической составляющей напряжений при различных коэффициентах Пуассона и внутреннего трения: а) для коэффициентов Пуассона $\nu = 0, 0.05, 0.2, 0.3, 0.4$ ($\gamma = 0$); б) для коэффициентов внутреннего трения $\gamma = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$, ($\nu = 0.3$).

На рисунке 4б представлены частотные зависимости радиального напряжения $|\sigma_{rr}^{(din)}(f)|$ на расстояниях от оси скважины $r=2a=0,05$ м (верхние кривые) и $r=20a=0,5$ м (нижние кривые). Из графиков видно, как с ростом коэффициента внутреннего трения уменьшаются значения напряжений. Так, например, при ча-

стоте 10 кГц на расстоянии от оси скважины $r=20a=0,5$ м увеличение коэффициента γ от 0 до 0.2 приводит к уменьшению радиального напряжения в 3.75 раза.

Частотные характеристики радиальных напряжений на рис. 4 показывают, что при учете внутреннего трения в массиве, напряжения с ростом частоты монотонно возрастают, доходят до некоторого максимума и затем монотонно убывают, т.е. имеют слабо выраженный резонансный характер. При этом с увеличением коэффициента трения максимумы напряжений сдвигаются в область меньших частот. Если внутреннее трение в среде не учитывать, то с ростом частоты напряжения растут, доходя до некоторого значения, и далее практически не изменяются.

2. Влияние горизонтальных границ пласта на радиальные напряжения вокруг скважины

Из строгого решения статической задачи для полуплоскости с круговым отверстием, полученного Д.И. Шерманом, следует, что влияние свободной от напряжений земной поверхности на напряженное состояние можно не учитывать уже на глубине более пяти радиусов [2]. В случае динамических напряжений возникающих при гидроимпульсном воздействии на поверхность скважины на глубинах во много раз превосходящих её радиус влиянием земной поверхности можно также пренебрегать.

Однако при импульсном нагнетании жидкости в скважину, расположенную параллельно плоским границам горизонтального угольного пласта в горной породе, волны напряжений распространяясь от поверхности скважины, взаимодействуют с почвой и кровлей пласта, что существенно может изменить картину напряженного состояния.

Поэтому, для оценки влияния пород кровли и почвы пласта на распределение напряжений в окрестности горизонтальной скважины, необходимо знать решение краевой задачи о волновом поле линейного гармонического источника упругих волн в слое. Решение такой задачи для упругого слоя, $|y| \leq h, |x| < \infty$ сцепленного с окружающей его породой, получено в [5]. Динамическая составляющая радиального напряжения $\sigma_{rr}^{(str)}(r)$ в окрестности скважины при импульсном нагнетании жидкости представлялась в виде линейной суперпозиции напряжений от колебаний поверхности скважины в безграничной среде $\sigma_{rr}^{(din)}(r)$, определяемой согласно (8), и дополнительного напряжения $\sigma_{rr}^{(add)}(r)$, возникающего вследствие взаимодействия волн напряжений от скважины с границами слоя:

$$\sigma_{rr}^{(str)}(r) = \sigma_{rr}^{(din)}(r) + \sigma_{rr}^{(add)}(r). \quad (16)$$

Приведем полученное в этой работе выражение для расчета зависимости напряжений от расстояния до центра скважины радиуса $r = a$, в направлении, составляющем с горизонтальной осью угол $\mathcal{Q} = \pi/4$ при нагнетании жидкости под давлением определяемым импульсами (5), (6). Полагая $x = y < h, 2x^2 < a^2, r = \sqrt{x^2 + y^2} = x\sqrt{2}$, в этом случае динамическая составляющая радиального напряжения в слое имеет вид:

$$\sigma_{rr}^{(str)}(x, x) = \frac{E\rho k_1^2}{2(1+\nu)\mu k_2^2} \left\{ \frac{k_1}{b} H_0^{(2)}(k_1 x \sqrt{2}) - \frac{\sqrt{2} H_1^{(2)}(k_1 x \sqrt{2})}{x} + \frac{2ik_1}{\pi} \left(\frac{1+2\nu}{1-2\nu} \right) \text{Int}(x, x) \right\} \left[\frac{2k_1^2}{ak_2^2} H_1^{(2)}(k_1 a) - k_1 H_0^{(2)}(k_1 a) \right]^{-1}, \quad (17)$$

$$\text{Int}(x, x) = \int_0^\infty \frac{P(\xi, x)}{Q(\xi)} d\xi - i\pi \sum_k \frac{P(\xi_k)}{dQ(\xi)/d\xi} \Big|_{\xi=\xi_k}, \quad (18)$$

$$P(\xi) = \frac{1 + \frac{i\xi^2}{\gamma_1 \gamma_2} \text{tg} \gamma_2 h}{\gamma_1 \cos \gamma_1 h} e^{-i\xi \gamma_1 h} \cos \gamma_1 x \cos \xi x \quad Q(\xi) = \text{tg} \gamma_1 h + \frac{\xi^2}{\gamma_1 \gamma_2} \text{tg} \gamma_2 h, \quad (19)$$

$$\frac{dQ(\xi)}{d\xi} = \frac{\xi}{\gamma_1 \gamma_2} \left(2\text{tg} \gamma_2 h - \frac{h\xi^2}{\gamma_2 \cos^2 \gamma_2 h} \right) + \xi^3 \left(\frac{1}{\gamma_1^3 \gamma_2} + \frac{1}{\gamma_1 \gamma_2^3} \right) \text{tg} \gamma_2 h - \frac{h\xi}{\gamma_1 \cos^2 \gamma_1 h}. \quad (20)$$

В выражении (18), $\xi_k - k$ -й корень трансцендентного уравнения $\frac{\text{tg} \gamma_1 h}{\text{tg} \gamma_2 h} = -\frac{\xi^2}{\gamma_1 \gamma_2}$.

В (17)-(20): $k_1 = 2\pi f \sqrt{\rho(1-2\nu)/2\mu(1-\nu)}$, $k_2 = 2\pi f \sqrt{\rho/\mu}$ – волновые числа продольной и поперечной волн в упругой среде; $\gamma_{1,2} = \sqrt{k_{1,2}^2 - \xi^2}$, $|\xi| < k_{1,2}$, $\gamma_{1,2} = -i\sqrt{\xi^2 - k_{1,2}^2}$, $|\xi| > k_{1,2}$

Для получения полного выражения составляющей $\sigma_{rr}^{(add)}(r)$ в (16), к динамической составляющей (17) обусловленной динамической составляющей p_{din} импульсного давления (5), (6), необходимо добавить напряжения, возникающие вследствие действия статической составляющей p_{st} импульса давления.

Так как радиус скважины $r = a = 0.025$ м, а толщина слоя – $2h = 2$ м, то их отношение велико ($2h/a = 80$) и влиянием границ на статическую составляющую напряжения в слое можно пренебречь. Поэтому, как и в случае безграничной среды, для статической составляющей напряжения при гидроимпульсном воздействии будем использовать выражение (7). Расчеты проводились при следующих параметрах среды: $2h = 2$ м, $f = 1000$ Гц, $E = 4$ ГПа, $\nu = 0.2$.

На рис. 5 представлены графики зависимости радиальных напряжений от расстояния до её центра при импульсном нагнетании жидкости в скважину в безграничном массиве (кривая 1) и в слое вдоль радиуса по направлению $\vartheta = \pi/4$ (кривая 2).

Из рисунка видно, что наличие границ угольного пласта, сцепленного с окружающей породой, приводит к замедлению спада напряжений при удалении

от поверхности скважины, в сравнении со случаем изменения напряжения в безграничной среде. Так на расстоянии $r=0.28$ м, (что составляет $r \approx 11a$) от центра скважины, напряжения в слое больше напряжения в безграничной среде в 2.67раза, а на расстоянии $r=1.078$ м $\approx 43a$ соответствующим локальному максимуму напряжения в слое – в 4.88раза.

Качественно картина изменения напряжения в слое при удалении от поверхности скважины немонотонна: вначале убывают до минимума ($r = 0.71$ м), затем возрастают до максимума ($r=1.078$ м), и далее, при приближении к поверхности слоя, убывают. В то же время в безграничной среде напряжения при удалении от поверхности скважины убывают монотонно и быстрее чем в слое.

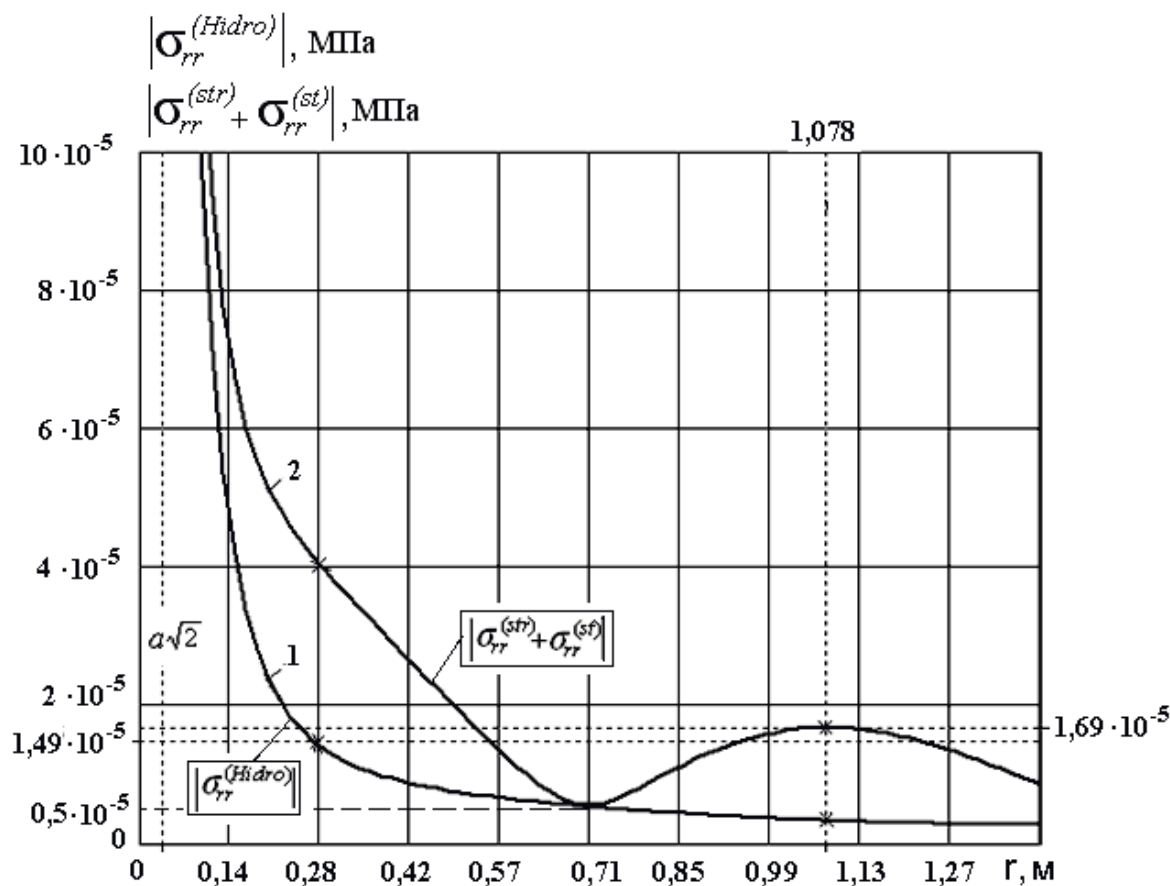


Рис. 5. Влияние границ угольного пласта на распределение радиальных напряжений в окрестности скважины: 1 – напряжения на расстоянии r от центра скважины в безграничной среде; 2 – напряжения на расстоянии r от центра скважины в слое в направлении $\vartheta = \pi/4$

Выводы

Анализ изменения линий уровня напряжений вокруг скважины и напряжений на ее поверхности при нагнетании жидкости показал следующее. При значении коэффициента $\lambda=0,5$ величина радиальных напряжений на ее поверх-

ности изменяется от нуля (при поллой скважине) до максимальной величины импульсного давления – 15 МПа, при этом напряжение $\sigma_{rr}(a)$ не зависит от угла ϑ . При удалении от центра скважины радиальные напряжения приближаются к величине горного давления γH , а в горизонтальных направлениях – к величине $\lambda (\gamma H)$.

В отличие от поведения радиальных компонент напряжений при коэффициенте $\lambda=0,5$, максимальные напряжения (10) на поверхности скважины зависят от угла ϑ и не зависят от давления импульса при нагнетании жидкости. Это объясняется тем, что напряжения σ_{\max} определяются только тангенциальной компонентой (3) порождаемой горным давлением, которая при нагнетании жидкости не изменяется т.к. последняя не создает касательных напряжений, а лишь только радиальные. Показано, что напряжения σ_{\max} и коэффициент концентрации напряжений K_{σ} имеют наибольшие абсолютные значения ($\sigma_{\max}=-50$ МПа, $K_{\sigma}=2,5$) в горизонтальных концах диаметра контура скважины, а минимальные ($\sigma_{\max}=-10$ МПа, $K_{\sigma}=0,5$) – на концах вертикального диаметра.

При $\lambda=1$, с увеличением расстояния от поверхности скважины по любому радиальному направлению, как радиальные, так и максимальные напряжения устремляются к значению γH . Как и в случае $\lambda=0,5$, на поверхности скважины радиальные напряжения растут от нуля (при поллой скважине) до максимальной величины – 15 МПа при нагнетании жидкости. Значение максимальных напряжений σ_{\max} при $\lambda=1$ не зависит от импульсного давления и определяется зависимостью (15) от радиальной координаты.

Анализ АЧХ радиальных напряжений показывает, что величина внутреннего трения в массиве влияет на характер кривых. С увеличением сил трения максимумы напряжений сдвигаются в область меньших частот, и их амплитуды уменьшаются. С ростом коэффициента Пуассона динамическая составляющая радиальных напряжений увеличивается во всем рассмотренном диапазоне частот $f=0 - 25$ кГц.

Влияние границы пласта на напряжения вокруг скважины оценивается изменением напряжений по мере удаления от скважины. Так, наличие границ приводит к замедлению спада напряжений и на некотором расстоянии от центра скважины появляется локальный максимум, после чего напряжения опять монотонно убывают. Это указывает на то, что при гидроимпульсном воздействии вокруг скважины возникают условия для развития трещин в направлении к кровле и почве пласта.

Список литературы

1. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий / Г.Н. Савин – Киев: Наук. думка, 1968. – 888 с
2. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев – М.: Недра, 1982. – 272 с.
3. Новацкий В. Теория упругости. /В. Новацкий – М.: Мир, 1975. – 872 с.
4. Сницер А.Р. Волны при нормальном гармоническом нагружении скважины в упругой среде. I. Структура волнового поля на поверхности скважины и в дальней зоне. / А.Р. Сницер // Динамические системы. – 2006. – Вып. 20 – С. 67-88.

5. Сницер А.Р. Передача давления в угольный пласт при гидроимпульсном нагнетании жидкости в скважину / А.Р. Сницер, Л.М. Васильев, В.В. Зберовский, И.Ф. Чугунков // Геотехническая механика. Межвед. сб. научн. трудов.– Днепропетровск, 2012.– № 104.– С.52-61.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бондаренком В.І.
Надійшла до редакції 15.03.2015*

УДК 622.647.2

© Р.В. Кирия, Н.Г. Ларионов

ПРЕДЕЛЬНЫЙ УГОЛ НАКЛОНА КОНВЕЙЕРА С ЛЕНТОЙ ГЛУБОКОЙ ЖЕЛОБЧАТОСТИ

В статье на основании теории сыпучей среды найдена зависимость предельного угла наклона ленточного конвейера с лентой глубокой желобчатости от угла наклона боковых роликов. При этом предполагалось, что лента представляет собой короб, состоящий из бесконечно длинных упругих пластин, растянутых силами натяжения. В результате определен предельный угол наклона конвейера.

У статті на підставі теорії сипучого середовища знайдена залежність граничного кута нахилу стрічкового конвеєра зі стрічкою глибокої жолобчатості від кута нахилу бічних роликів. При цьому передбачалося, що стрічка є короб, який складається з нескінченно довгих пружних пластин, розтягнутих силами натягу. В результаті визначено граничний кут нахилу конвеєра.

The article is found on the basis of the theory of granular material dependence of the maximum angle of inclination of the conveyor belt with belt deep grooved on the angle of inclination of the side rollers. It was assumed that the tape is a box composed of infinitely long elastic plates stretched tension forces. As a result, defined limit angle of inclination of the conveyor.

Введение. Вопросами определения предельного угла наклона конвейера с лентой глубокой желобчатости занимались многие исследователи, такие как Е. Е. Шешко, В. М. Гущин, А. И. Барышев и др.

В работах [1, 2] получены зависимости предельного угла наклона конвейера с лентой глубокой желобчатости с гирляндными роликоопорами.

При этом предполагалось, что удержание груза на ленте конвейера осуществляется за счет сил трения груза о ленту, обусловленных силами бокового распора груза, вызванными сжатием и развалом ленты при ее движении по роликоопорам конвейера. Эти силы трения груза о ленту конвейера уравниваются горизонтальной составляющей силы тяжести груза, направленной вниз вдоль ленты конвейера.

В работе [3] определен предельный угол наклона конвейера с трехроликовой опорой и лентой глубокой желобчатости. При этом предполагалось, что лента представляет собой упругий короб с нулевой изгибной жесткостью и растянутый силой натяжения. В этом случае на груз действует сила трения со стороны ленты конвейера, обусловленная силами нормальной составляющей от