

А.Р. Сницер, в. н. с.
(ТНУ им. Вернадского),
В.В. Зборовский, с. н. с.,
Д.Л. Васильев, н. с.
(ИГТМ),
А.А. Потапенко, инж.,
А.А. Ангеловский, инж.
(ПАО «Краснодонуголь»)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ СКВАЖИНЫ ПРИ ГИДРОИМПУЛЬСНОМ РЫХЛЕНИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Досліджено залежності напружень навколо горизонтальної свердловини у вугільному масиві від частоти тиску гідроімпульсного нагнітання рідини, коефіцієнта внутрішнього тертя та відстані до осі свердловини.

INVESTIGATION OF THE RADIAL STRESS AROUND THE WELL AT HYDRO-PULSE LOOSENING OF COAL BEDS

The dependence of the stresses around the horizontal well in the carboniferous formation on the frequency of pulse pressure of the hydro-impulse injection of fluid, coefficient of internal friction and distance to the axis of a well are investigated.

Одним из путей повышения эффективности гидрорыхления угольных пластов в забоях подготовительных выработок является применение гидроимпульсного воздействия. Однако до настоящего времени характер передачи угольному пласту импульсов автоколебаний давления жидкости, генерируемых устройством гидроимпульсного воздействия, остается малоисследованным. В связи с этим теоретическое обоснование напряженно-деформированного состояния, возникающего в угольном массиве вокруг скважины при импульсном нагнетании жидкости в режиме периодически срывной кавитации, приобретает особый научный интерес.

Целью данной работы является исследование передачи импульсов автоколебаний давления угольному пласту в фильтрационной части скважины от частоты импульсов и физико-механических свойств угольного массива. Исследование проводится в рамках упругой модели среды, поэтому полученные результаты будут основаны на решениях уравнений статической и динамической теории упругости. При этом рассматривается плосконапряженное состояние среды, что справедливо для скважин достаточно большой протяженности.

При импульсном нагнетании жидкости в скважину в режиме периодически срывной кавитации динамическими параметрами являются значения пульсаций давления жидкости на выходе из кавитационного генератора. Размах автоколебаний давления жидкости Δp представляет собой разницу меж-

ду максимальным и минимальным значениями давления в импульсе $\Delta p = p_{\max} - p_{\min}$ [1].

При гармонической зависимости импульса давления от времени, мгновенное давление в скважине можно представить в виде суммы постоянной (статической) и осциллирующей (динамической) составляющих:

$$p = p_{st.} + p_{din.} \quad p_{st} = \bar{p} = (p_{\max} + p_{\min})/2, \quad p_{din} = 0.5\Delta p \cos(\omega t) \quad (1)$$

так что

$$p = \bar{p} + 0.5\Delta p \cos(\omega t), \quad (2)$$

На рисунке 1 представлена зависимость импульса давления от времени на выходе из кавитационного генератора при $p_{\max} = 15$ МПа и $p_{\min} = 5$ МПа, а также разложение этого импульса на статическую и динамическую составляющие.

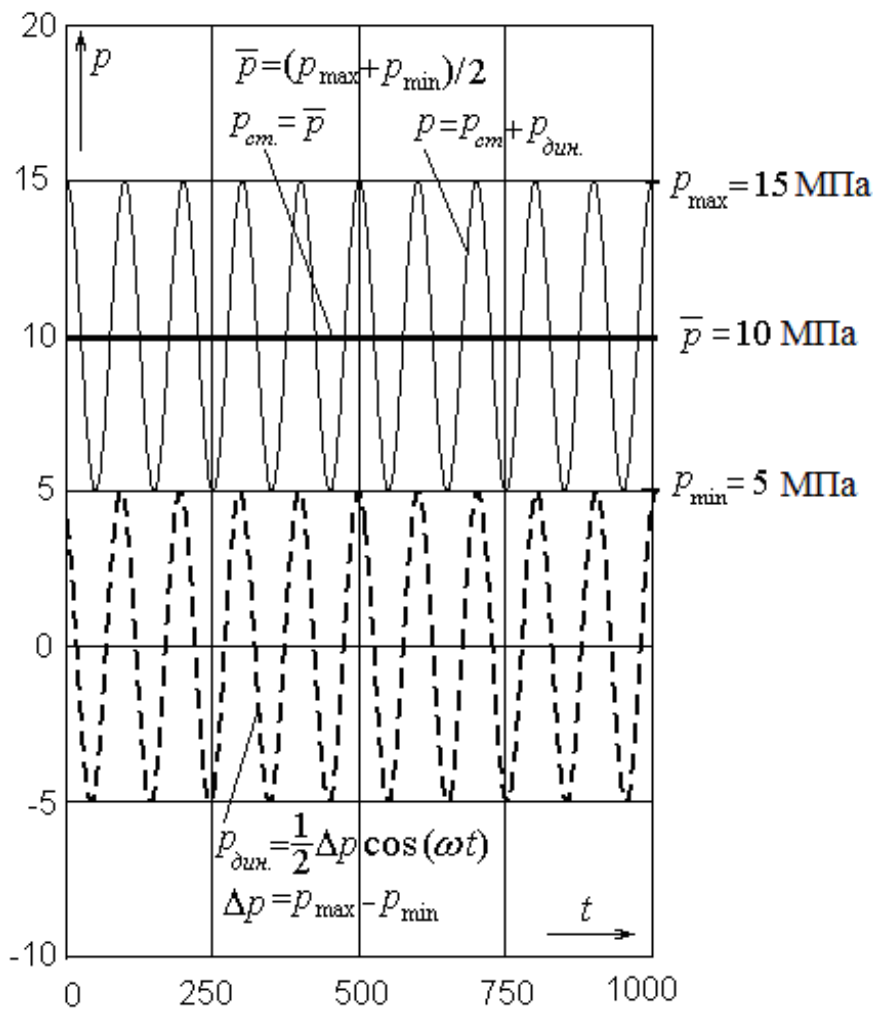


Рис. 1 – Временная зависимость давления нагнетания жидкости в скважину.

Рассмотрим напряженное состояние массива в окрестности горизонтальной скважины. При импульсном нагнетании жидкости в горизонтальную скважину бесконечной протяженности, находящуюся на глубине H от дневной поверхности, напряжения вокруг скважины определяются тензором напряжений $\hat{\sigma}$, который можно представить как линейную суперпозицию 2-х тензоров. Один из них, $\hat{\sigma}^{(\gamma H)}$ – определяется горным давлением, другой, $\hat{\sigma}^{(Hidro)}$ – давлением гидроимпульсного нагнетания жидкости в скважину:

$$\hat{\sigma} = \hat{\sigma}^{(\gamma H)} + \hat{\sigma}^{(Hidro)}. \quad (3)$$

Для определения полной картины напряженного состояния вокруг скважины необходимо знать вклад каждой составляющей суперпозиции.

Тензор напряжений, связанный с горным давлением определяется решением плоской задачи теории упругости о сжатии упругой плоскости с круговым отверстием свободным от напряжений. Такая задача с учетом коэффициента бокового давления λ решена методом Колосова-Мусхелишвили [2] и приведена в монографиях [3,4]. Компоненты тензора напряжений $\hat{\sigma}^{(\gamma H)}$ записанные в цилиндрической системе координат для такой задачи имеют вид:

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

$$\sigma_{\theta\theta}^{(\gamma H)}(r) = -\frac{\gamma H}{2} \left[(1 + \lambda) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - (1 - \lambda) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\vartheta) \right], \quad (5)$$

$$\tau_{r\theta}^{(\gamma H)}(r) = \frac{\gamma H}{2} (1 - \lambda) \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin(2\vartheta). \quad (6)$$

В выражениях (5)-(7): γH – горное давление; a – радиус скважины; r – радиальная координата; ϑ – угловая координата, положительное значение угла отсчитывается от положительного направления вертикали (вверх) против часовой стрелки; λ – коэффициент бокового давления в массиве. При $\lambda = 1$ в гидростатическом поле напряжений создаваемых весомыми породами над скважиной, компоненты тензора напряжений вокруг скважины принимают вид:

$$\sigma_{rr}^{(\gamma H)}(r) = -\gamma H \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right), \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(\gamma H)}(r) = -\gamma H \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right), \quad (8)$$

$$\tau_{r\theta}^{(\gamma H)}(r) = 0. \quad (9)$$

Тензор напряжений, связанный с импульсным нагнетанием жидкости в скважину определяется характером импульса давления, создаваемого кавитационным генератором. Представление импульса давления, p – (2) нагнетания жидкости в скважину в виде суммы статической, p_{st} и динамической, p_{din} составляющих, позволяет свести расчет возникающего при этом тензора напряжений $\hat{\sigma}^{(Hidro)}$ к линейной суперпозиции тензоров:

$$\hat{\sigma}^{(Hidro)} = \hat{\sigma}^{(st)} + \hat{\sigma}^{(din)}, \quad (10)$$

выраженных через решения двух известных краевых задач теории упругости.

Напряжения вокруг скважины, вызванные статической составляющей, p_{st} – (5) импульса давления, выраженные через известное решение задачи Ламе об осесимметричном нагружении кругового отверстия в бесконечной упругой пластине в цилиндрической системе координат имеют вид [5]:

$$\sigma_{rr}^{(st)}(r) = -\frac{a^2}{r^2} p_{st} \quad \sigma_{\theta\theta}^{(st)}(r) = \frac{a^2}{r^2} p_{st} \quad \tau_{r\theta}^{(st)}(r) = 0 \quad (11)$$

Компоненты тензора напряжений, связанные с динамической составляющей импульса давления нагнетания жидкости, p_{din} определяются решением динамической краевой задачи теории упругости о гармоническом осесимметричном нагружении поверхности скважины в неограниченной упругой среде [5,6]:

$$\sigma_{rr}^{(din)}(r) = -0.5 \Delta p \frac{2br^{-1}H_1^{(2)}(k_1r) - k_1H_0^{(2)}(k_1r)}{2ba^{-1}H_1^{(2)}(k_1a) - k_1H_0^{(2)}(k_1a)}, \quad (12)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(din)}(r) = 0.5 \Delta p \frac{2br^{-1}H_1^{(2)}(k_1r) + k_1(1-2b)H_0^{(2)}(k_1r)}{2ba^{-1}H_1^{(2)}(k_1a) - k_1H_0^{(2)}(k_1a)}, \quad (13)$$

$$\sigma_{zz}^{(din)}(r) = 0.5 \Delta p \frac{\nu}{(1-\nu)} \frac{k_1H_0^{(2)}(k_1r)}{2ba^{-1}H_1^{(2)}(k_1a) - k_1H_0^{(2)}(k_1a)}, \quad (14)$$

прочие компоненты тензора напряжений равны нулю. В (13) - (15): $H_n^{(2)}(k_1r)$

– 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 сдвига, f – частота гармонического воздействия на поверхность скважины, $b = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}$, Δp определяется согласно выражению (1).

В итоге радиальную компоненту тензора напряжений порождаемого импульсом давления p – (3) кавитационного генератора можно записать в виде:

$$\sigma_{rr}^{(Hidro)}(r,t) = \left| \sigma_{rr}^{(st)}(r) \right| + \left| \sigma_{rr}^{(din)}(r) \right| \cos(\omega t) = \frac{a^2}{r^2} p_{st} + \left| 0.5 \Delta p \frac{2 \frac{b}{r} H_1^{(2)}(k_1 r) - k_1 H_0^{(2)}(k_1 r)}{2 \frac{b}{a} H_1^{(2)}(k_1 a) - k_1 H_0^{(2)}(k_1 a)} \right| \cos(\omega t) \quad (15)$$

Максимальное и минимальное значение выражения (16) имеет вид:

$$\left| \sigma_{rr}^{(Hidro)}(r,t) \right|_{\max, \min} = \left| \sigma_{rr}^{(st)}(r) \right| \pm \left| \sigma_{rr}^{(din)}(r) \right|. \quad (16)$$

Рассмотрим амплитудно-частотные характеристики динамической составляющей радиальной компоненты тензора напряжений. Результаты расчетов зависимости модуля динамической составляющей радиальной компоненты напряжения $\left| \sigma_{rr}^{(din)}(f) \right|$ от частоты импульсов вокруг скважины радиуса $a=0,025$ для значений радиальной координаты $r=a, 2a, 4a, 8a, 20a, 60a$ (кривые 1-6 соответственно), и заданных значениях физических свойств массива: модуле упругости – $E=4$ ГПа; коэффициенте Пуассона – $\nu=0,2$; плотности массива – $\rho=1,5 \cdot 10^3$ кг/м³ и коэффициенте внутреннего трения – $\gamma=0$ приведены на рисунке 2.

Из расчетов видно, что модули напряжений независимо от точек наблюдения с ростом частоты импульсов от 2,0 кГц до 10кГц монотонно возрастают. Затем достигают своего максимального значения и далее с ростом частоты не изменяются. Максимальные напряжения формируются на поверхности скважины и по мере удаления в глубину массива уменьшаются. Так на поверхности скважины при частоте $f=10$ кГц амплитуды напряжений в 8 раз превышают напряжения на расстоянии $60a$ от оси скважины.

Для оценки влияния коэффициента Пуассона на амплитудно-частотные характеристики динамической составляющей радиальных напряжений, были проведены расчеты последних на расстоянии $r = 2a = 0,05$ м от оси скважины при указанных выше физических характеристиках углепородного массива и различных значениях коэффициента Пуассона: $\nu = 0,05; 0,2; 0,3; 0,4$ (рис. 3).

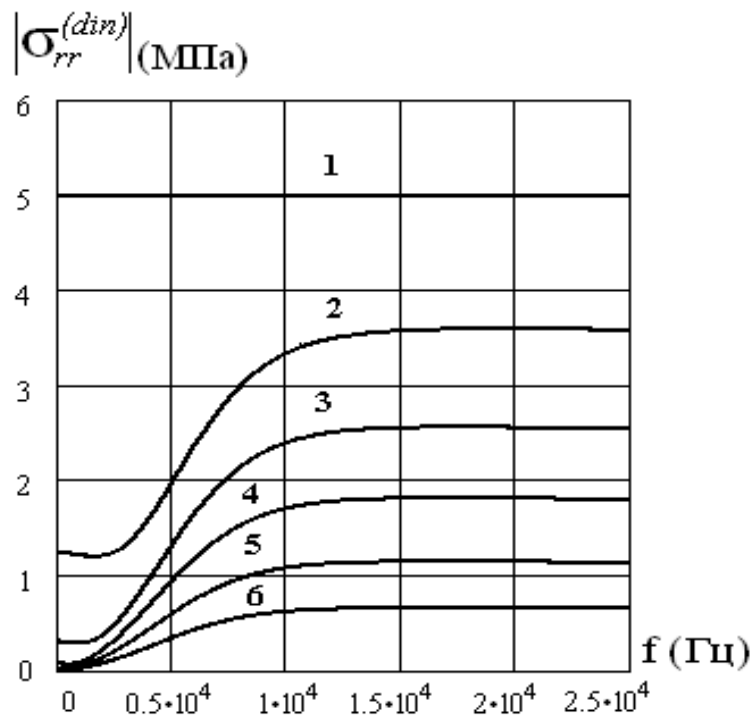


Рис. 2 – Амплитудно-частотные зависимости модуля комплексной амплитуды динамической составляющей радиальной компоненты напряжения

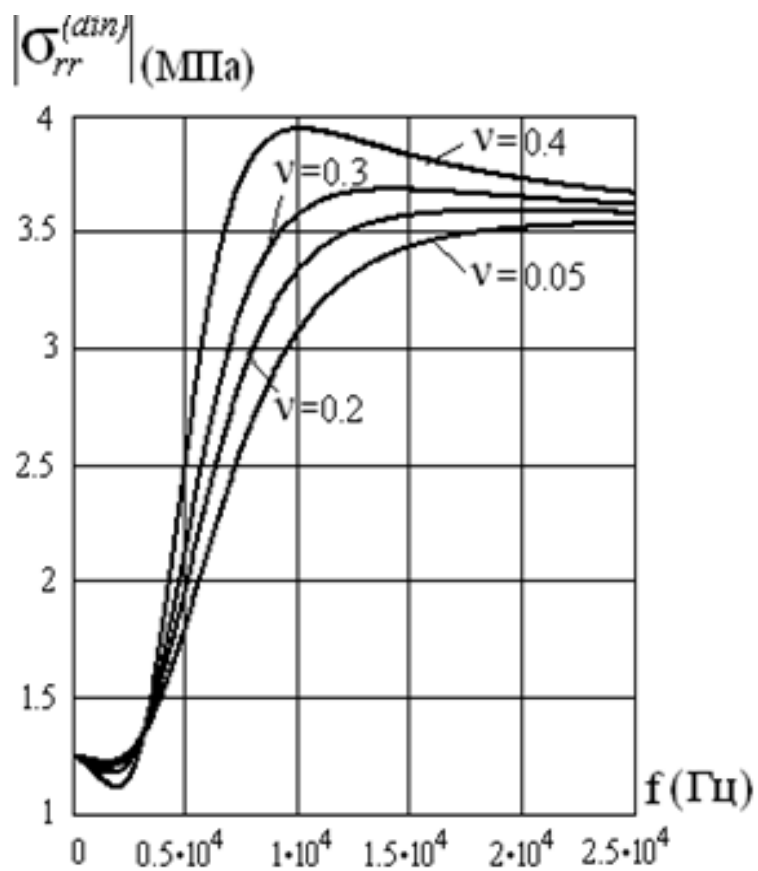


Рис. 3 – Влияние коэффициента Пуассона на амплитудно-частотные характеристики модуля комплексной амплитуды динамической составляющей радиальной компоненты

Из графиков видно, что с ростом коэффициента Пуассона модули напряжений увеличиваются.

Для оценки влияния диссипации, введем коэффициент внутреннего трения γ . Воспользуемся формулой, связывающей модуль упругости E и модуль сдвига μ : $\mu = E/2(1+\nu)$. Для введения внутреннего трения в среду вещественный модуль сдвига заменяется комплексным $\hat{\mu} = \mu e^{i\gamma}$ [7].

На рисунке 4 приведены графики частотных зависимостей модуля радиальных напряжений $|\sigma_{rr}^{(din)}(f)|$ при параметрах массива: $E=4$ ГПа; $\nu=0,3$; $\rho=1,5 \cdot 10^3$ кг/м³ и коэффициентах внутреннего трения $\gamma = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$. Верхние линии соответствуют радиальному расстоянию от оси скважины $r = 2a = 0,05$ м, нижние – расстоянию $r = 20a = 0,5$ м. Из графиков видно как уменьшаются значения напряжений с ростом коэффициента внутреннего трения γ .

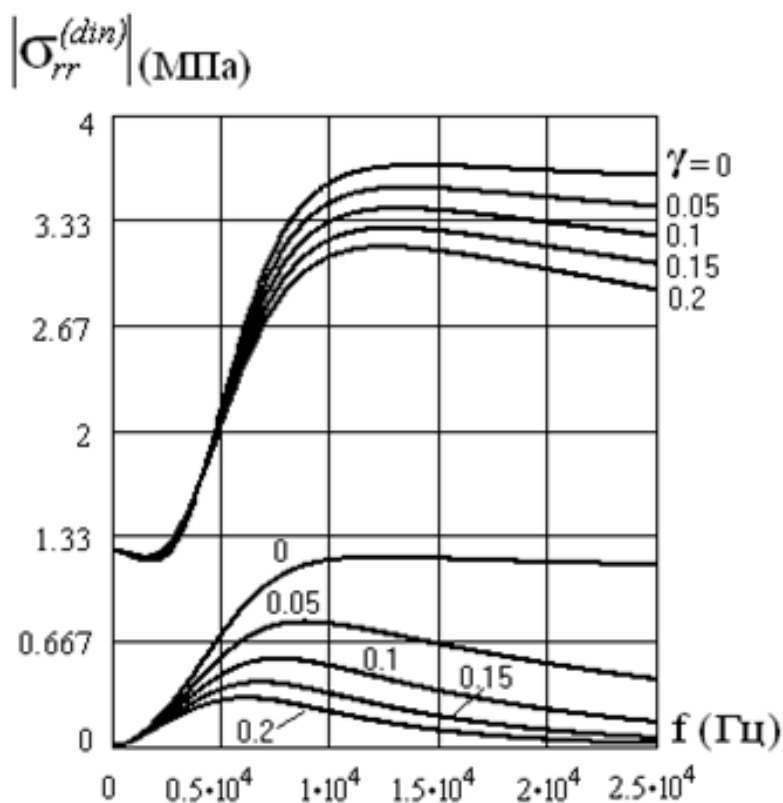


Рис. 4 – Влияние коэффициента внутреннего трения на амплитудно-частотные характеристики модуля комплексной амплитуды динамической составляющей радиальной компоненты напряжения

Из аналогичных графиков на рисунке 5 видно существование частотных максимумов модуля напряжений. При этом с уменьшением внутреннего трения резонансная частота возрастает. Так для $\gamma = 0,2$ максимум модуля напряжений приходится приблизительно на частоту 6000 Гц, в то время как для $\gamma = 0,02$ – на частоту 10000 Гц.

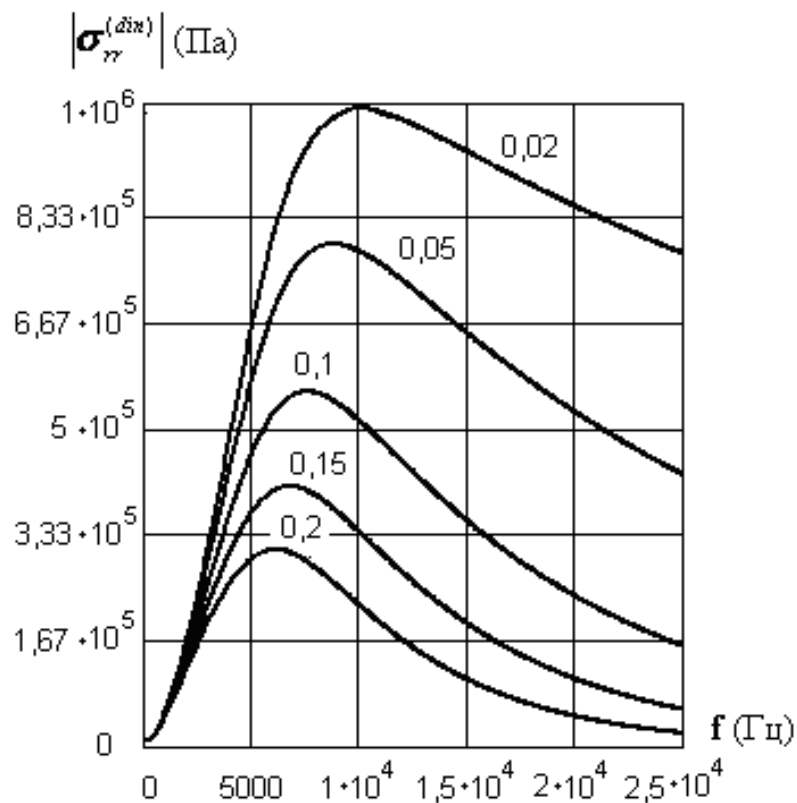


Рис. 5 – Влияние коэффициента внутреннего трения на амплитудно-частотные характеристики модуля комплексной амплитуды динамической составляющей радиальной компоненты напряжения

Рассмотрим зависимости радиальной компоненты тензора напряжений от расстояния до оси скважины с учетом горного давления. В этом случае, для оценки напряжений вокруг горизонтальной скважины расположенной на глубине H от дневной поверхности при импульсном нагнетании в нее жидкости, следует сложить напряжения (16) – $|\sigma_{rr}^{(Hydro)}|$, возникающие в результате нагнетания жидкости и напряжения, создаваемые горным давлением $\sigma_{rr}^{(\gamma H)}(r)$ – (5).

На рисунке 6 приведены зависимости радиальных компонент напряжений вокруг скважины от расстояния r до ее оси.

Расчеты проведены для частоты импульсов кавитационных автоколебаний $f = 7000$ Гц и следующих параметров среды: $\gamma H = -20$ МПа^{*)} – горное давление на глубине H ; $\lambda = 1$ – коэффициент бокового давления; $\nu = 0,2$; $E = 4$ ГПа; $a = 0,025$ м; $\gamma = 0$. Кривая 1 показывает зависимость напряжения $\sigma_{rr}^{(\gamma H)}(r)$ вокруг скважины, вызванного лишь горным давлением. Из графика видно, что уже на расстоянии $r = 0,2$ м от оси скважины напряжение выходит на величину равную $\gamma H = -20$ МПа.

*) Отрицательные напряжения считаются сжимающими, а положительные – растягивающими.

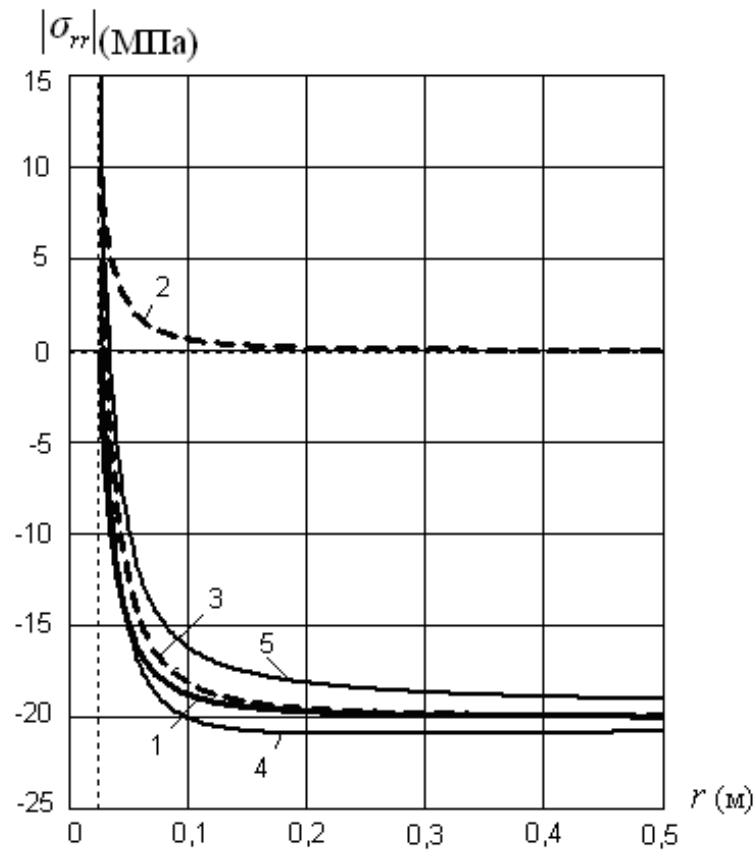


Рис. 6 – Радиальные напряжения вокруг горизонтальной скважины, расположенной на глубине h от дневной поверхности, при импульсном нагнетании жидкости

Кривая 2 характеризует напряжение $\sigma_{rr}^{(st)}(r)$ – (12), вызванное статической составляющей давления (2) импульсного нагнетания жидкости в скважину. Кривая 3 – результирующее статическое напряжение вокруг скважины. Кривые 4, 5 отвечают максимальным и минимальным значениям радиальных напряжений, возникающих при сложении статического напряжения с динамической составляющей напряжения $\pm \left| \sigma_{rr}^{(din)}(r) \right|$, связанного с кавитационными автоколебаниями нагнетаемой жидкости.

На рисунке 7 более детально можно увидеть распределение вкладов всех компонент радиальных напряжений, как на поверхности скважины, так и в её окрестности.

Так, из графиков видно, что на поверхности скважины $r = a = 0,025$ м, вклад горного давления отсутствует $-\sigma_{rr}^{(H)}(a) = 0$ (кривая 1); вклад статической составляющей давления гидроимпульса, определяемый согласно (2), (12) равен 10 МПа (кривая 2), вклад динамической составляющей импульсного нагнетания жидкости, определяемый согласно (2) в сумме со статическими составляющими дает $\sigma_{\min}(a) = 5$ МПа (кривая 4) и $\sigma_{\max}(a) = 15$ МПа (кривая 5).

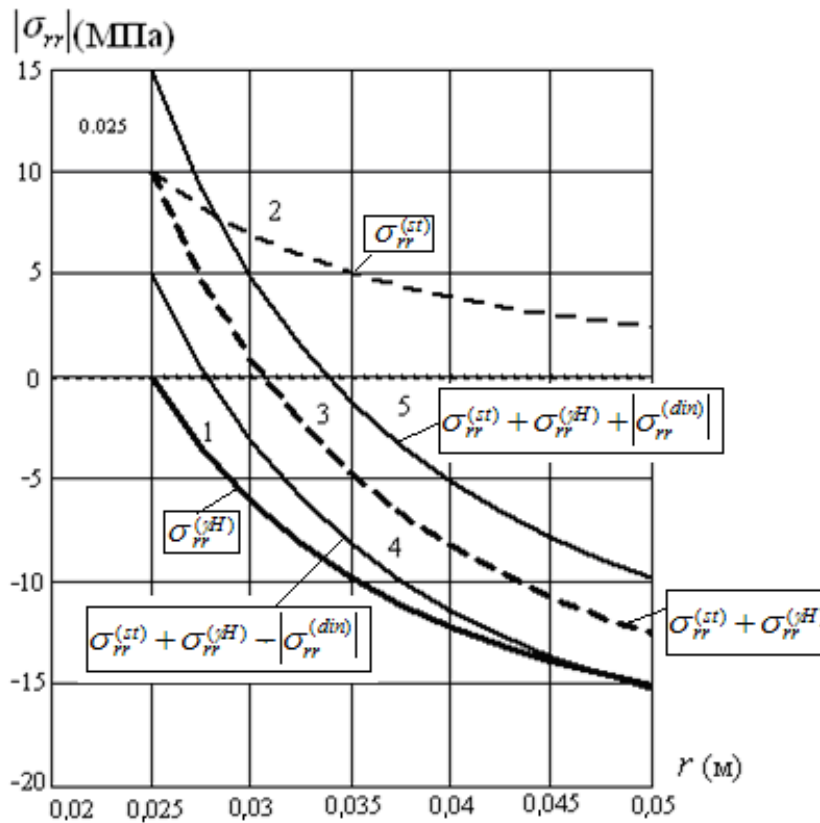


Рис. 7 – Радиальные напряжения на поверхности и в окрестности горизонтальной скважины, расположенной на глубине H от дневной поверхности, при импульсном нагнетании жидкости

Исходя из вышеизложенного сформулируем следующие выводы.

На основе аналитического решения задачи о статическом нагружении кругового отверстия в бесконечной упругой пластине и задачи о гармоническом нагружении поверхности скважины в неограниченной упругой среде, получены выражения для напряжений вокруг скважины в угольном массиве при импульсном нагнетании жидкости.

Численный анализ радиальных напряжений, возникающих вокруг скважины благодаря передаче импульсов автоколебаний давления жидкости при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт, показал: амплитудно-частотные характеристики радиальных напряжений имеют резонансный характер; с ростом коэффициента внутреннего трения значения резонансных частот и амплитуд уменьшаются; радиальные напряжения в угольном массиве максимально проявляются на поверхности скважины; с ростом коэффициента Пуассона амплитуды радиальных напряжений возрастают на всех частотах; максимальные значения радиальных напряжений на поверхности скважины формируются при частоте автоколебаний давления от 2кГц до 10 кГц, что инициирует развитие деформаций сдвига в прискважинной зоне вокруг фильтрационной части скважины.

Настоящая работа выполнена в рамках научного сотрудничества НИИ проблем геодинамики ТНУ им. В.И. Вернадского и Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Л.М. Генератор и герметизатор шпура для гидроимпульсного воздействия на угольный массив в технологическом процессе противовыбросных мероприятий / Л.М. Васильев, Ю.А. Жулай, Н.Я. Трохимец, В.В. Зберовский, П.Ю. Моисенко // Геотехническая механика. – 2005. – Вып. 61 – С. 314-322.
2. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили – М: Изд. Академии наук СССР, 1954. – 648 с.
3. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий / Г.Н. Савин – Киев: Наук. думка, 1968. – 888 с.
4. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев – М.: Недра, 1982. – 272 с.
5. Новацкий В. Теория упругости. /В. Новацкий – М.: Мир, 1975. – 872 с.
6. 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.
8. Трофимчук А.Н. Динамика пористо-упругих насыщенных жидкостью сред. / А.Н. Трофимчук, А.М. Гомилко, О.А. Савицкий – К.: Наук. думка, 2003. – 232 с.