

«ГИ УрО РАН»

**К ОЦЕНКЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ
ГОРНЫХ ПОРОД, НАХОДЯЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ
ТЕКТОНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

И. Л. Паньков

Пермь - 2019

ЕСТЕСТВЕННОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ: общие сведения

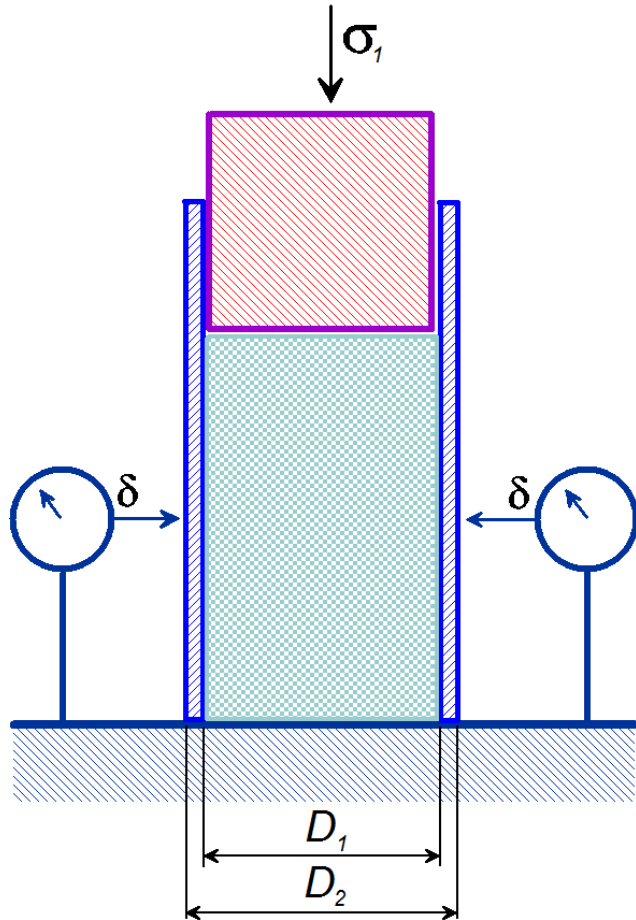
- Традиционно принято различать два типа естественного поля напряжений: гравитационное и тектоническое.

- Для гравитационного напряженного состояния горизонтальные реактивные боковые напряжения обусловлены вертикальными активными напряжениями, численно равными весу налегающих горных пород. При этом, горизонтальная составляющая (напряжение бокового распора) традиционно определяется либо в соответствии с гидростатической гипотезой А. Гейма (1878 г.), либо с гипотезой А.Н. Динника (1925 г.), вытекающей из физических уравнений теории упругости.

- Для тектонического напряженного состояния характерно наложение на гравитационное поле добавочных горизонтальных активных напряжений, обусловленных региональными тектоническими процессами в земной коре. Вертикальная составляющая тектонического поля напряжений, как и в случае с гравитационным полем, определяется давлением налегающих пород.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БОКОВОГО РАСПОРА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ : схема эксперимента¹

Схема
эксперимента



Комплект упругих
металлических матриц



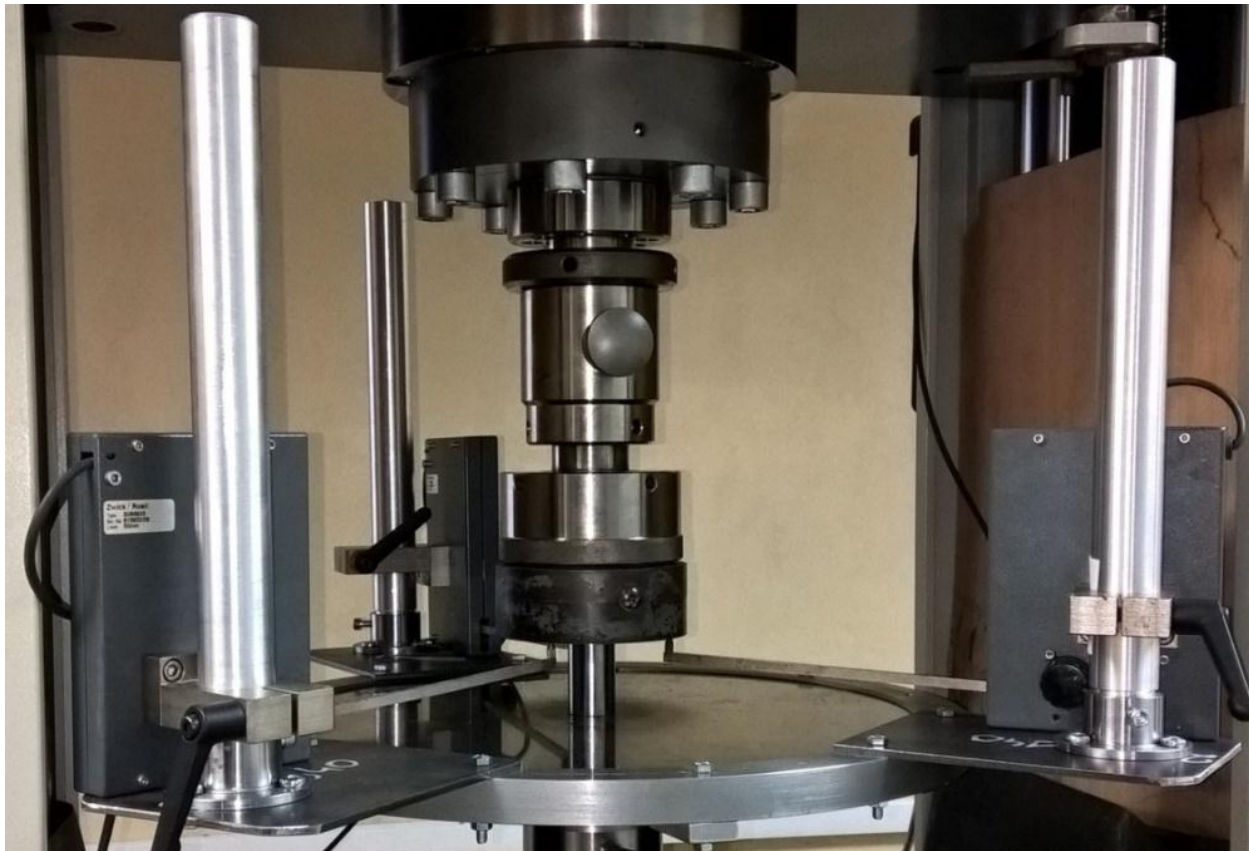
Оценка напряжений
бокового распора

$$\sigma_H = \delta \frac{E_m \cdot h}{R^2}$$

¹ Паньков И.Л. Изучение механизма бокового распора гравитационного поля напряжений в горных породах / Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. / Вып. 14 ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016, с.110-112.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БОКОВОГО РАСПОРА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ: проведение эксперимента

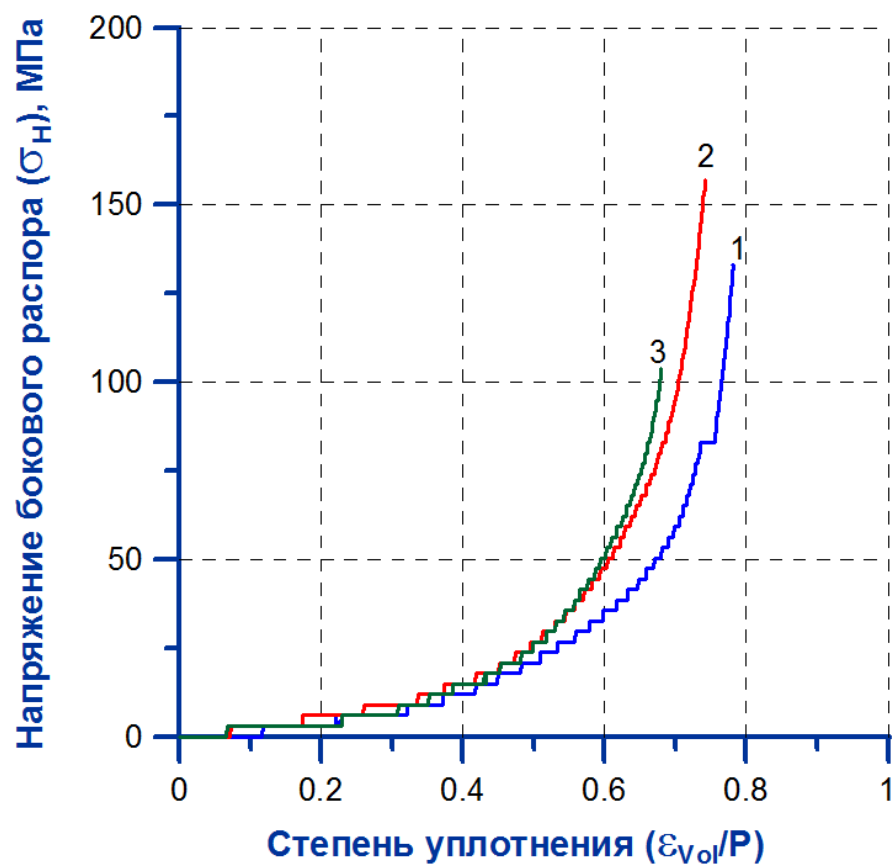
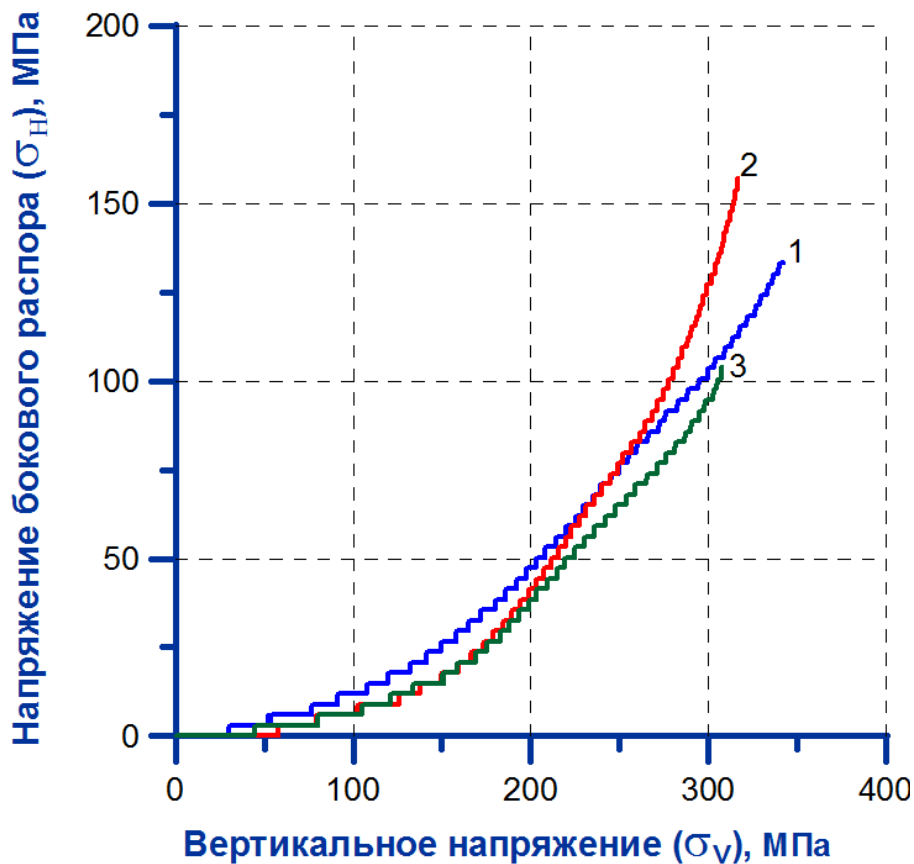
**Электромеханический пресс
Zwick/Z250**



**Вид
спрессованных
соляных образцов
(после проведения
эксперимента)**



ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БОКОВОГО РАСПОРА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ: результаты эксперимента

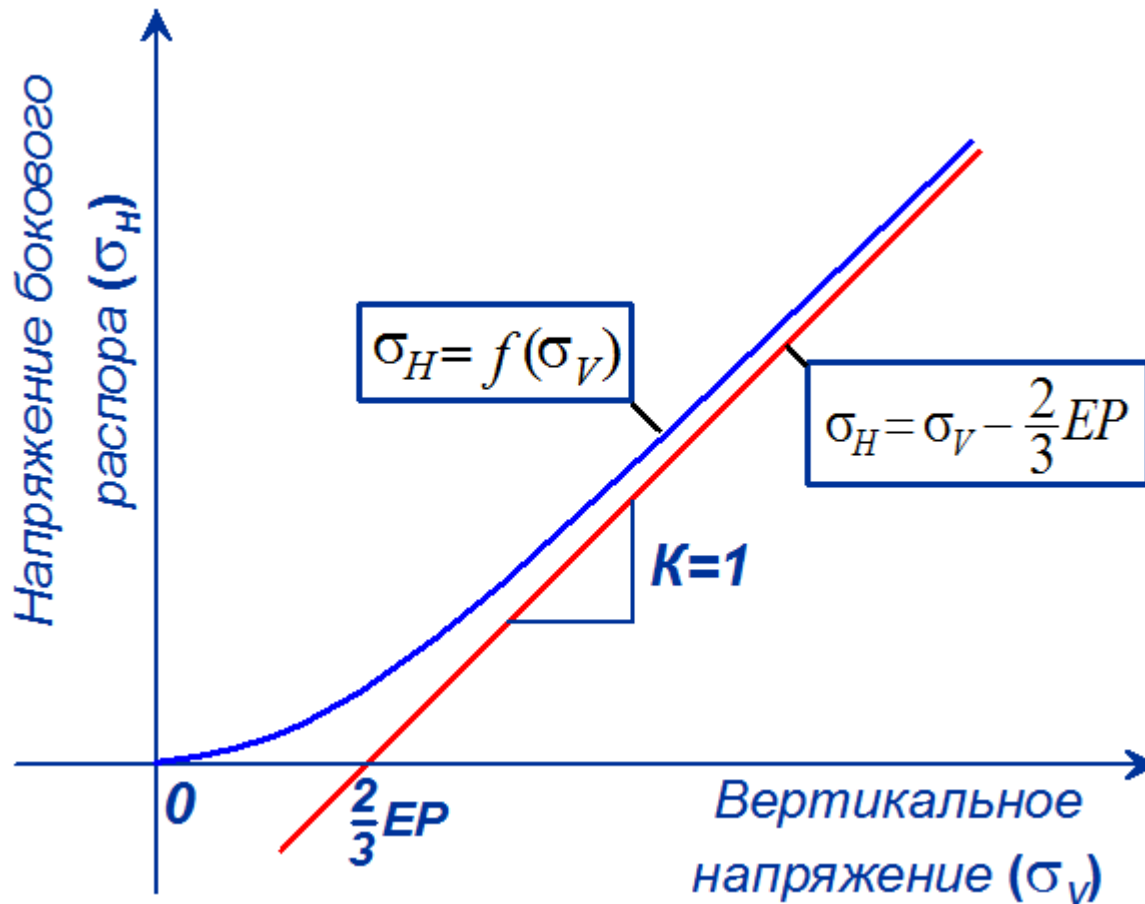


ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БОКОВОГО РАСПОРА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ: механизм формирования

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что увеличение напряжений и коэффициента бокового распора связано с возможностью деформирования горных пород внутрь порового пространства:

- при всестороннем сжатии, вызывающем закрытие пор, и как следствие, возрастания степени уплотнения пород, эта возможность уменьшается, что способствует увеличению передачи вертикального напряжения в боковых направлениях;**
- отсутствие пор или их полное закрытие обуславливает гидростатическое состояние гравитационного поля напряжений в горных породах.**

ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ: влияние веса налегающих пород на величину напряжений бокового распора^{2,3}



σ_H	Горизонтальное напряжение
$\sigma_V = \gamma H$	Вертикальное напряжение
σ_p	Прочность на растяжение
E	Модуль деформации
P	Общая пористость
γ	Объемный вес
H	Глубина

² **Паньков И.Л.** Физическое моделирование и теоретическая оценка бокового распора в горных породах под действием силы тяжести. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, № 5, 2016, с. 68-75.

³ **Паньков И.Л.** Метод теоретической оценки бокового распора горных пород в нетронутом массиве при действии гравитационного поля напряжений / Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017, с. 116-119.

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ: метод теоретической оценки величины бокового распора в массиве горных пород⁴

Обобщенный закона Гука

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_V = \frac{1}{E} (\sigma_V - \nu(\sigma_{H \max} + \sigma_{H \min})) \\ \varepsilon_{H \max} = \frac{1}{E} (\sigma_{H \max} - \nu(\sigma_V + \sigma_{H \min})) \\ \varepsilon_{H \min} = \frac{1}{E} (\sigma_{H \min} - \nu(\sigma_V + \sigma_{H \max})) \end{array} \right. \quad (1)$$

Объемная деформация горных пород, находящихся в условиях всестороннего сжатия

$$\varepsilon_{Vol} = \varepsilon_V + \varepsilon_{H \max} + \varepsilon_{H \min} = \frac{1}{E} (\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min})(1 - 2\nu) \quad (2)$$

⁴ **Паньков И.Л.** О методе теоретической оценки величины бокового распора при действии тектонических сил в массиве горных пород / Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. / Вып. 16 ГИ УРО РАН. – Пермь, 2018. – С. 114 – 118. (DOI: 10.7242/GDSP/2018.16.29)

При всестороннем сжатии уплотняющейся породы при условии

$$\sigma_V + \sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}} \rightarrow \infty \quad (3)$$

величина объемной деформации стремиться к общей пористости

$$\varepsilon_{Vol} \rightarrow P \quad (4)$$

В соответствии с условием (4) выражение (2) запишется в виде

$$EP = (\sigma_V + \sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}})(1 - 2\nu) \quad (5)$$

Из формулы (5) следует

$$2\nu = \frac{\sigma_V + \sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}} - EP}{\sigma_V + \sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}}} \quad (6)$$

Описание уплотнения горных пород при высоких значениях суммы сжимающих напряжений, действующих в массиве вводится условие

$$\sigma_V + \sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}} \gg EP \quad (7)$$

В этом случае правую часть уравнения (6) можно преобразовать с помощью следующего приближительного равенства:

$$\frac{\sigma_V + \sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}} - EP}{\sigma_V + \sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}}} \approx \frac{\sigma_V + \sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}}}{\sigma_V + \sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}} + EP} \quad (8)$$

Тогда выражение для коэффициента Пуассона горных пород, находящихся в поле действия тектонических сил, запишется в виде

$$\nu = \frac{\sigma_V + \sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}}}{2(\sigma_V + \sigma_{H_{\max}} + \sigma_{H_{\min}} + EP)} \quad (9)$$

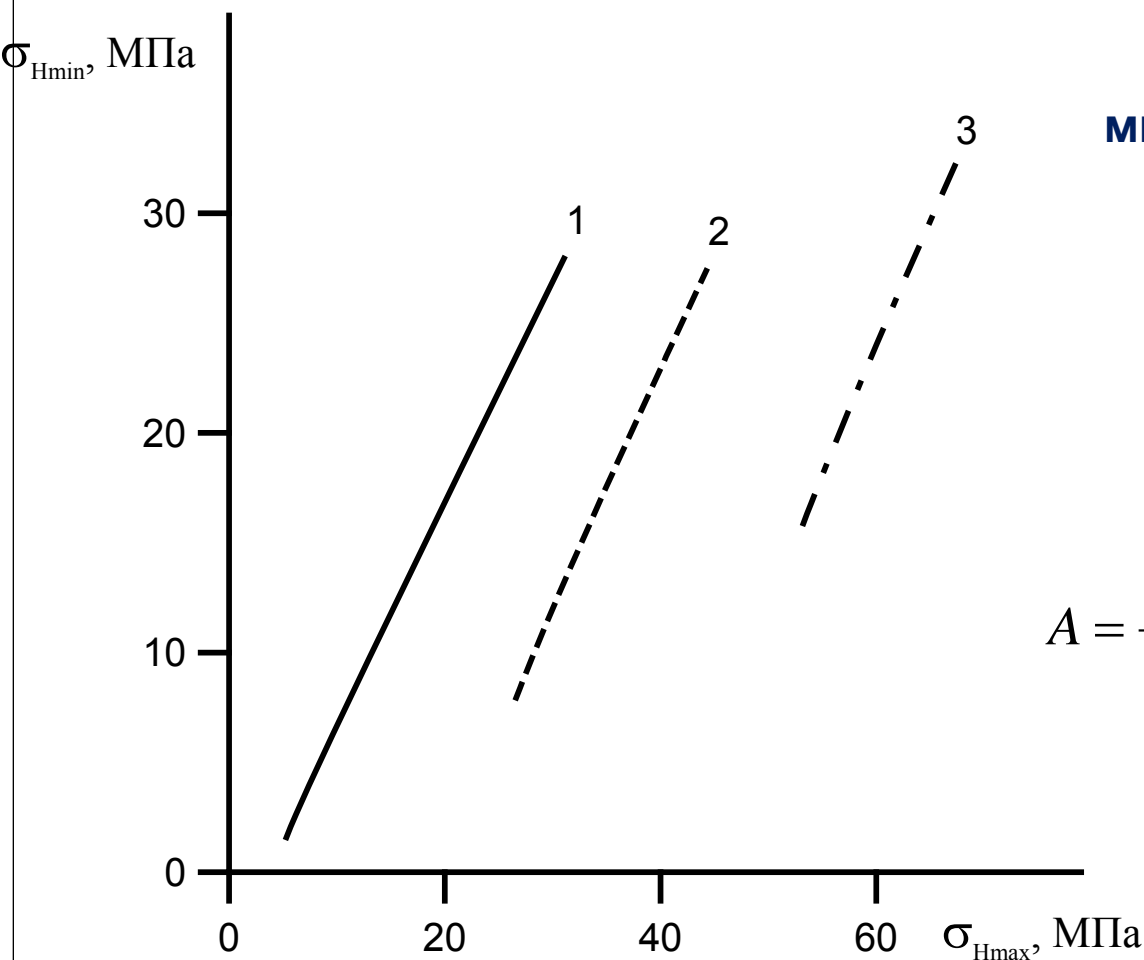
Физические уравнения, определяющие связь напряжений и деформаций в уплотняющихся пористых породах нетронутого массива, находящегося в условиях всестороннего сжатия

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_V = \frac{1}{E} \left(\sigma_V - \frac{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}}{2(\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} + PE)} (\sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}) \right) \\ \varepsilon_{H \max} = \frac{1}{E} \left(\sigma_{H \max} - \frac{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}}{2(\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} + PE)} (\sigma_V + \sigma_{H \min}) \right) \\ \varepsilon_{H \min} = \frac{1}{E} \left(\sigma_{H \min} - \frac{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}}{2(\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} + PE)} (\sigma_V + \sigma_{H \max}) \right) \end{array} \right. \quad (10)$$

Определение величины горизонтальных напряжений с помощью системы рекуррентных соотношений

$$\left\{ \begin{array}{l} (\sigma_{H \max})_n = E\varepsilon_{H \max} + \frac{\sigma_V + (\sigma_{H \max})_{n-1} + (\sigma_{H \min})_{n-1}}{2(\sigma_V + (\sigma_{H \max})_{n-1} + (\sigma_{H \min})_{n-1} + PE)} (\sigma_V + (\sigma_{H \min})_{n-1}) \\ (\sigma_{H \min})_n = E\varepsilon_{H \min} + \frac{\sigma_V + (\sigma_{H \max})_{n-1} + (\sigma_{H \min})_{n-1}}{2(\sigma_V + (\sigma_{H \max})_{n-1} + (\sigma_{H \min})_{n-1} + PE)} (\sigma_V + (\sigma_{H \max})_{n-1}) \end{array} \right. \quad (11)$$

ХАРАКТЕР ВЗАИМОСВЯЗИ МАКСИМАЛЬНОГО И МИНИМАЛЬНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ТЕКТОНИЧЕСКИ-НАПРЯЖЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД С РАЗЛИЧНЫМ МОДУЛЕМ ДЕФОРМАЦИИ



Формула связи между минимальной и максимальной компонентами напряжений

$$\sigma_{Hmin} \approx \sigma_{Hmax} - A \quad (12)$$

где

$$A = \frac{E(\varepsilon_{Hmax} - \varepsilon_{Hmin})}{1 + \frac{\sigma_V + \sigma_{Hmax} + \sigma_{Hmin}}{2(\sigma_V + \sigma_{Hmax} + \sigma_{Hmin} + PE)}} \quad (13)$$

1 – $E = 1$ ГПа; 2 – $E = 5$ ГПа; 3 – $E = 10$ ГПа

Принимая для (13) приближительные равенства

$$\sigma_{H \max} \approx E\varepsilon_{H \max}, \quad \sigma_{H \min} \approx E\varepsilon_{H \min} \quad (14)$$

Получаем величину А

$$A \approx \frac{E(\varepsilon_{H \max} - \varepsilon_{H \min})}{1 + \frac{\sigma_V + E\varepsilon_{H \max} + E\varepsilon_{H \min}}{2(\sigma_V + E\varepsilon_{H \max} + E\varepsilon_{H \min} + PE)}} \quad (15)$$

Окончательное выражение для максимального горизонтального напряжения принимает вид

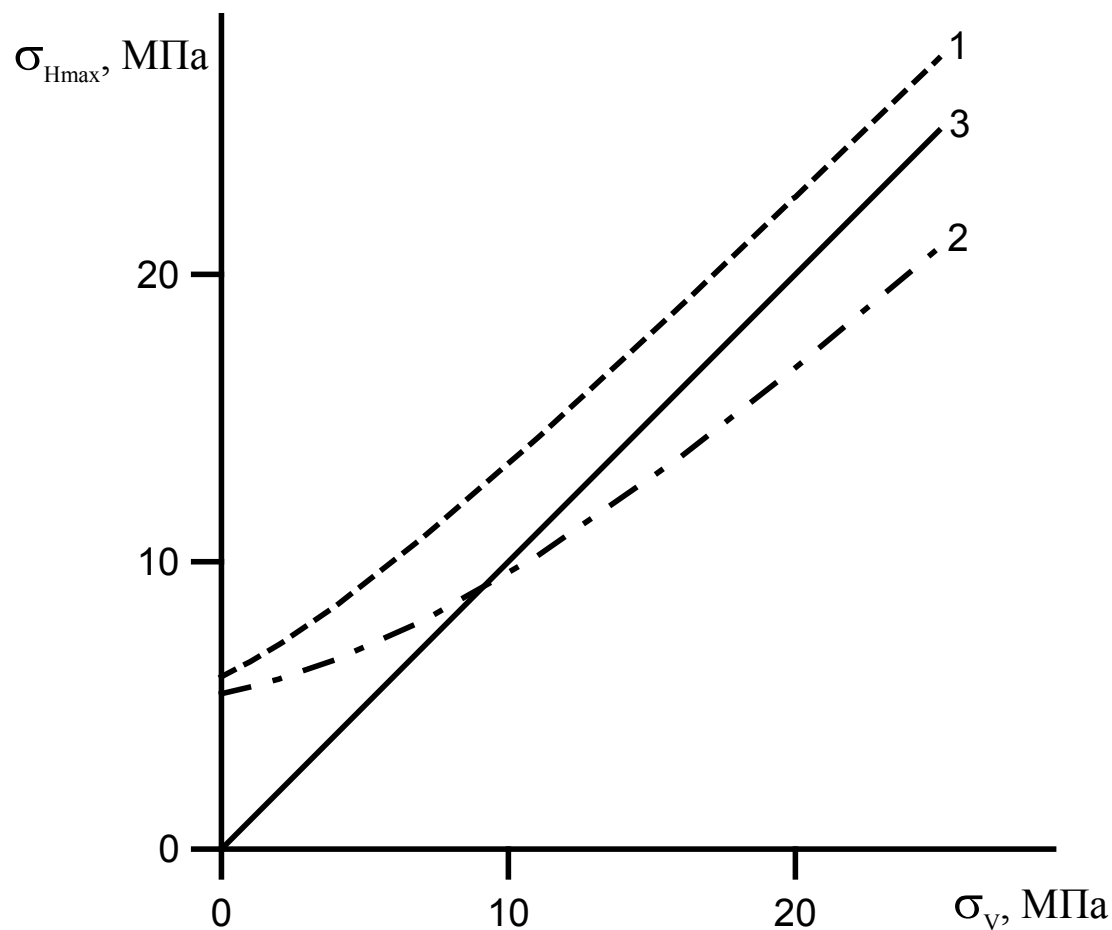
$$\sigma_{H \max} \approx \frac{\sigma_V - 2PE - A + 4B + \sqrt{(\sigma_V - 2PE - A + 4B)^2 + 16(\sigma_V + PE - A)B + 8(\sigma_V - A)^2}}{4} \quad (16)$$

где $B = E\varepsilon_{H \max}$

КЛАССИФИКАЦИЯ НАЧАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Вид поля напряжений	Величина горизонтальных деформаций	Характеристика состояния массива
Гравитационное	$\varepsilon_{H \max} = \varepsilon_{H \min} = 0$	Состояние массива в условиях нулевого тектонического воздействия.
Тектоническое	$\varepsilon_{H \max} > 0, \varepsilon_{H \min} = 0$	Состояние массива в условиях линейно-направленного тектонического воздействия.
	$\varepsilon_{H \max} \geq \varepsilon_{H \min} > 0$	Состояние массива в условиях плоско-направленного тектонического воздействия

ТИПЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ



**1 – распределение первого типа; 2 – распределение второго типа;
3 – гидростатическое распределение**

ВЫВОДЫ

- На основе предложенной системы физических уравнений, определяющих связь напряжений и деформаций в уплотняющихся пористых породах нетронутого массива, находящегося в условиях всестороннего сжатия получены оценочные формулы определения максимального и минимального горизонтальных напряжений нетронутого массива, находящегося в условиях действия тектонических сил.
- Анализ полученных соотношений показывает, что тектоническое воздействие на массив проявляется исключительно наличием в породе горизонтальных деформаций, обусловленных смещением плит и блоков земной коры. В этой связи, гравитационное поле напряжений можно характеризовать как состояние массива, находящегося в условиях нулевого тектонического воздействия. Тектоническое поле напряжений предлагается характеризовать как состояние массива находящегося в условиях линейно-направленного или плоско-направленного тектонического воздействия.
- Установлено два типа распределений горизонтальных напряжений в зависимости от вертикального давления. Распределение первого типа характеризует горизонтальные напряжения, которые возрастая с глубиной, всегда остаются больше вертикального давления с коэффициентом бокового распора стремящимся к единице. Распределение второго типа характеризует горизонтальные напряжения изначально большие вертикального давления возрастая с глубиной, сначала сравниваются, а затем становятся меньше вертикальной компоненты с коэффициентом бокового распора стремящимся к единице.

Спасибо за внимание!