

УДК 622.28, 622.831

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ  
НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД**

**Л. М. Васильев, Д. Л. Васильев**

*Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины,  
E-mail: vdl\_2007@mail.ru,  
ул. Симферопольская, 2-а, 49005, г. Днепрпетровск, Украина*

Показано, что горизонтальные нормальные напряжения, растягивающие и сжимающие, в том числе и превышающие вертикальные, в массивах горных пород формируются контактным трением между их слоями.

*Горизонтальные нормальные напряжения, горное давление, горные породы, сопротивление материала сдвигу, коэффициенты контактного и внутреннего трения*

Развитие горнорудной и угольной промышленности ведет к увеличению глубины разработки месторождений твердых полезных ископаемых, что в свою очередь приводит к качественному и количественному изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) горных массивов, к ухудшению производственной обстановки в подземных выработках. Кроме того, с увеличением глубины возрастает интенсивность динамических проявлений горного давления в виде таких грозных явлений, как горные удары и внезапные выбросы. Это в конечном итоге вызывает увеличение капиталовложений, усложнение процессов выемки полезных ископаемых, снижение рентабельности предприятий и безопасности ведения горных работ. Поэтому роль знаний о НДС горного массива, позволяющих находить рациональные способы управления горным давлением, добычи полезных ископаемых, борьбы с динамическими проявлениями и внезапными обрушениями пород, приобретает первостепенное значение для горнодобывающей промышленности. Разработка научных методов и аналитическая оценка напряженно-деформированного состояния горных массивов с давних пор привлекали внимание ученых и инженеров горного производства.

Независимо от методологии оценка несущей способности горных массивов проводится по вертикальным и горизонтальным нормальным составляющим напряжений. Что касается определения вертикального напряжения, то ученые пришли к единому мнению о формировании его гравитационными силами. Сложнее обстоит дело с методологией расчета горизонтальных нормальных напряжений, не получивших еще глубокого теоретического объяснения, при высоких значениях которых довольно часто отмечаются динамические проявления горного давления. В ранние периоды исследований для расчета горизонтальных напряжений широко использовалась концепция А. Н. Динника. Но поворотным моментом в геомеханике стало открытие уче-

ными на основании новых инструментальных методов исследования НДС горных массивов в 60-е годы прошлого века горизонтальных напряжений, превышающих в 3–10 раз вертикальные [1]. В механике горных пород и грунтов, основанной на теории предельного равновесия, использовалась физическая формула горизонтальных напряжений, полученная с учетом паспорта прочности. Но и она не дает значений горизонтальных напряжений, превышающих вертикальные. “О механизме формирования повышенных тектонических напряжений в верхних горизонтах земной коры в геологической литературе высказан ряд гипотез, что подчеркивает неясность природы рассматриваемого феномена” [1].

Проблема определения НДС имеет важное не только научное, но и практическое значение, поскольку оно порождает грозные динамические проявления горного давления. Во всем мире ведутся интенсивные исследования по поиску способов управления НДС горных массивов [1–12]. В настоящее время проводится углубленное изучение тектонических структур различных порядков, в основе которых лежат численные значения напряжений [2, 3]. С. А. Неверовым сформулированы четыре режима механического нагружения горных пород, которые подлежат учету: нетектонический (нарушения пликативного типа) —  $\sigma_y > \sigma_{x\max} > \sigma_{x\min}$ ; сбросовый —  $\sigma_y \geq \sigma_{x\max} > \sigma_{x\min}$ ; сдвиговый —  $\sigma_{x\max} > \sigma_y > \sigma_{x\min}$ ; взбросовый или взбросо-сдвиговый (сложный) —  $\sigma_{x\max} > \sigma_{x\min} > \sigma_y$ , имеющие важное прикладное значение при производстве горных работ.

Таким образом, изложенное свидетельствует о необходимости раскрытия механизма формирования горизонтальных нормальных напряжений, превышающих нормальные вертикальные напряжения. Покажем, что этот механизм формируется контактными касательными напряжениями от трения между слоями горных пород, в частности между кровлей и пластом, и может быть описан известными приемами теории упругости и пластичности.

Исходной позицией является наличие обнажения в разрабатываемых горных массивах. Даже при замерах напряжений в нетронутым массиве имеет место обнажение последнего в скважинных методах исследований НДС. В реальных условиях в вырабатываемом слоистом массиве под действием горного давления более слабые слои деформируются в горизонтальном направлении в сторону обнажения, отчего возникают касательные напряжения от контактного трения, которые и формируют горизонтальные нормальные напряжения подпора. В связи с этим возникает замечание по известной формуле А. Н. Динника. Эта формула выведена из условия сжатия вертикальной нагрузкой тела в обойме с абсолютно жесткими стенками, которые создают отпор вертикальному нагружению. Поэтому горизонтальные напряжения не могут превышать вертикальные.

Рассмотрим взаимодействие кровли и пласта полезного ископаемого. В основу предлагаемого метода расчета горизонтальных напряжений положен известный прием равновесия сил, действующих по граням элемента тела. Для упрощения решения напряжения по граням принимаем равномерно распределенными. Учтем, что породы кровли и пласта являются, как правило, разномодульными, т. е. при деформировании они имеют разные значения деформаций, при этом пласт характеризуется большей податливостью, особенно при наличии обнажения. Тогда можем принять, что в качестве граничных условий на одном из катетов равновесного прямоугольного треугольника приложено горное давление в виде вертикальной нагрузки  $\sigma_y = \gamma H$  ( $\gamma$  — плотность горных пород;  $H$  — глубина залегания пласта) и контактные касательные напряжения  $f\sigma_y$  ( $f$  — коэффициент контактного трения). На втором катете дейст-

вуют горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  и те же касательные напряжения  $f\sigma_y$  (по закону парности касательных напряжений), а на наклонной площадке — активные касательные напряжения  $\tau_\alpha$  и нормальные напряжения  $\sigma_\alpha$ . Тогда эффективные касательные напряжения согласно Кулону на экстремальной площадке

$$\tau = k = \tau_\alpha - \mu\sigma_\alpha, \quad (1)$$

где  $\mu$  — коэффициент внутреннего трения;  $k$  — текущее значение сопротивления материала сдвигу от сцепления.

Напряжения  $\tau_\alpha$  и  $\sigma_\alpha$  из условия равновесия треугольного элемента определяются известными формулами [13]:

$$\tau_\alpha = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + f\sigma_y \cos 2\alpha; \quad (2)$$

$$\sigma_\alpha = -\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - f\sigma_y \sin 2\alpha, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — угол между нормалью к наклонной площадке и осью  $X$ .

Если подставить выражения (2) и (3) в формулу (1) и исследовать полученное выражение на экстремум, то можно получить угол наклона траектории максимальных эффективных касательных напряжений (ТМЭКН) относительно горизонтали

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left( \frac{2\mu f\sigma_y - (\sigma_x - \sigma_y)}{\mu(\sigma_x - \sigma_y) + 2f\sigma_y} \right) + \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

На основании решения системы уравнений (1)–(3) при экстремальном угле  $\alpha$ , когда эффективные касательные напряжения  $\tau$  достигают максимального значения, получено уравнение

$$2k = \sqrt{(1 + \mu^2)[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4f^2\sigma_y^2]} - \mu(\sigma_x + \sigma_y). \quad (5)$$

Из (5) путем алгебраических преобразований имеем выражение для расчета горизонтального нормального напряжения

$$\sigma_x = \frac{2(k + \mu\sigma_y)}{\cos \rho} (\sin \rho - \sqrt{1 - b^2}) + \sigma_y, \quad (6)$$

где  $b = f\sigma_y / (k + \mu\sigma_y)$ , (7)

$\rho = \operatorname{arctg} \mu$  — угол внутреннего трения.

Выражение (7) определяет отношение касательного напряжения от трения на контактной поверхности к максимальному значению касательного напряжения (с учетом внутреннего трения) на плоскости внутри материала, параллельной контактной плоскости или на самой плоскости. Подчеркнем, что уравнение (6) является алгебраическим уравнением равновесия и вместе с известными дифференциальными уравнениями — обязательным условием равновесия для всех точек тела при оценке напряженного состояния.

Отметим, что выражение (6) можно получить из уравнения равновесия В. В. Соколовского [14], записанного в иной по сравнению с (5) неявной форме

$$\frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y) + \tau_{xy}^2 = \frac{\sin^2 \rho}{4} (\sigma_x + \sigma_y + 2k \operatorname{ctg} \rho).$$

Уравнение (6) позволяет рассчитывать весь спектр горизонтальных нормальных напряжений (растягивающих, сжимающих, включая гидростатические и превышающие вертикальные) в зависимости от параметров физико-механических свойств породы и величины горного давления. Растягивающие горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  возникают при условии превышения в выражении (6) отрицательной части над положительной. Возникновение различных по величине сжимающих напряжений обусловлено знаком разности множителя  $(\sin \rho - \sqrt{1-b^2})$ . При отрицательном значении этой разности  $0 < \sigma_x < \sigma_y$ , а при  $\sin \rho = \sqrt{1-b^2}$  возникает гидростатическое состояние. При положительном значении этой разности горизонтальные напряжения превышают вертикальные, так как положительная разность складывается с положительной величиной вертикального напряжения  $\sigma_y$ . Попутно отметим, что у некоторых специалистов значения нормальных горизонтальных напряжений, превышающих вертикальные, полученные на основании теории деформирования тела, вызывают недоумение. Подчеркиваем, что основания для этого нет. Так, И. А. Биргер и Р. Р. Мавлютов [13] отмечают, что условия равновесия предусматривают равновесие не напряжений (таких условий не существует), а действующих усилий по граням равновесного треугольника. Дело в том, что в зависимости от значения внешних нагрузок и коэффициентов внешнего и внутреннего трения материалов изменяются площади граней упомянутого треугольника в силу изменения его углов, что известно из теории сопротивления материалов. Соответственно изменяются силы на гранях треугольника.

Из преобразования разности в (6) получены критерии превышения вертикальных напряжений над горизонтальными, гидростатического состояния и превышения горизонтальных напряжений над вертикальными:

$$b = \left| \frac{f\sigma_y}{k + \mu\sigma_y} \right| < \cos \rho; \quad (8)$$

$$b = \left| \frac{f\sigma_y}{k + \mu\sigma_y} \right| = \cos \rho; \quad (9)$$

$$b = \left| \frac{f\sigma_y}{k + \mu\sigma_y} \right| > \cos \rho. \quad (10)$$

Из условия  $b = 1$  получено теоретически возможное максимальное значение контактного трения

$$f = \frac{k}{\sigma_y} + \mu.$$

Отметим, что из условия (10), на наш взгляд, представляется возможным раскрытие природы возникновения горных ударов, поскольку при этом условии на  $\pi/2$  поворачивается координатная система по сравнению с условием  $b < \cos \rho$  в силу того, что напряжение  $\sigma_x$  становится главным.

Если представить, что отсутствует трение между слоями пород, то формула (6) примет вид

$$\sigma_x = \frac{2(k + \mu\sigma_y)}{\cos \rho} (\sin \rho - 1) + \sigma_y. \quad (11)$$

Напряжение  $\sigma_y$  для пород при отсутствии внешнего трения определяется по известной формуле [15]

$$\sigma_y = \frac{2k \cos \rho}{1 - \sin \rho}. \quad (12)$$

После подстановки выражения (12) в формулу (11) получим

$$\sigma_x = \frac{-2k \cos^2 \rho + 2k \cos^2 \rho}{\cos \rho (1 - \sin \rho)}.$$

Следовательно, при отсутствии контактного трения напряжение  $\sigma_x = 0$ . Внутреннее трение самостоятельно не формирует напряжение  $\sigma_x$ . Приходим к известному в механике деформируемого тела постулату об отсутствии горизонтальных (поперечных) нормальных напряжений при вертикальном одноосном нагружении конечного тела при отсутствии контактных касательных напряжений.

Однако следует подчеркнуть, что изложенный метод аналитического определения напряжений, основанный на проецировании на плоскость сечения элемента внешних сил, обладает определенным недостатком. Для обеспечения равновесия элемента (треугольника) материала предполагается наличие нормальных напряжений  $\sigma_x$  в поперечном направлении. Данный подход не объясняет причину возникновения таких напряжений. Более наглядно природа возникновения этих напряжений раскрывается при использовании векторного метода равновесия внешних и внутренних сил, представляющих собой силы взаимодействия между элементами материала. Построим векторные диаграммы для трех случаев: для растягивающих, для сжимающих горизонтальных нормальных напряжений, меньших и превышающих вертикальные.

При расчете для первого случая принимаем сопротивление материала сдвигу равным единице, угол внутреннего трения  $56^\circ$ , коэффициент контактного трения 0.15. Расчетные значения  $\sigma_y = 4.0$ ,  $\sigma_x = -0.13$  и  $\alpha_1 = 64^\circ 20'$  относительно горизонтали. Изобразим треугольник  $abc$  (рис. 1) с углом  $\alpha_1 = 64^\circ 20'$  и гипотенузой  $ac$ , равной единице, на катетах действуют известное из расчета вертикальное нормальное напряжение и неизвестное горизонтальное нормальное напряжение и известные, равные между собой по закону парности касательные напряжения  $f\sigma_y$ . Выберем на поверхности скольжения (гипотенузе  $ac$ ) любую точку (точка  $O$  на диаграмме). В точке  $O$  сумма всех сил равна нулю, так как треугольник  $abc$  (в теории представляется точкой  $O$ ) находится в равновесии. Изобразим линию скольжения линией  $m-m$ . Вертикальную силу  $\bar{N}_B$  представим как сумму сил от вертикальных нормальных напряжений  $\sigma_y$ , умноженных на площадь  $av$ , и от касательных напряжений  $f\sigma_y$ , умноженных на площадь  $vc$ . Горизонтальная сила  $N_f$  определяется аналогично. Тогда  $N_B = \sigma_y \cos \alpha_1 - f\sigma_y \sin \alpha_1 = 1.12$  и  $N_f = f\sigma_y \cos \alpha_1 = 0.278$ .

Две внешние силы  $\bar{N}_B$  и  $\bar{N}_f$  образуют суммарный внешний вектор  $\bar{N}_\alpha$  ( $\overline{OP}$  на диаграмме), который должен быть уравновешен вектором  $\overline{OP'}$  внутренних сил, действующих по граням треугольного элемента. Сумма известных векторов сил, численно равных напряжениям  $\mu\bar{\sigma}_\alpha$ ,  $\bar{\sigma}_\alpha$  и  $\bar{k}$ , образует вектор  $\overline{OK}$ . Для достижения равенства суммы внутренних сил вектору внешних сил  $\overline{OP'}$  необходимо приращение внутренней силы  $\bar{N}_x$ , растягивающей материал на грани  $bc$  и имеющей вследствие этого отрицательный знак. Напряжения  $\sigma_x$  определяются путем деления силы  $\bar{N}_x$  на  $\sin \alpha_1$ . Это напряжение по численному значению и знаку совпадает с

напряжением, полученным по формуле (6). Отметим, что сумма векторов от внутреннего трения образует вектор  $\bar{T}$ , расположенный под углом внутреннего трения  $\rho$  относительно нормали к линии скольжения, согласно известному правилу механики движения тела на наклонной плоскости.

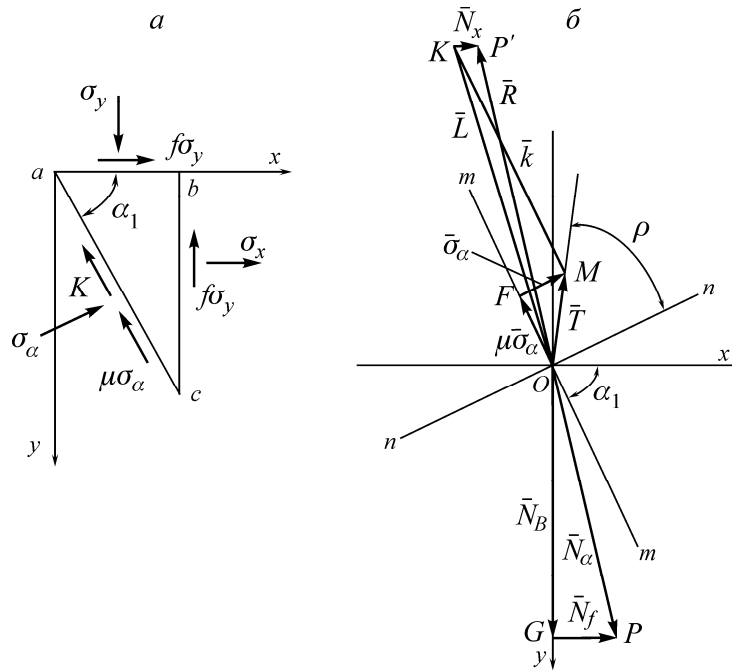


Рис. 1. Векторная диаграмма для определения горизонтальных нормальных растягивающих напряжений: *a* — равновесный треугольник; *b* — диаграмма

Приведем пример построения диаграммы, когда  $\sigma_x < \sigma_y$ . Покажем, что поперечное нормальное напряжение будет сжимающим (рис. 2). Для этого направим силы контактного трения в обратном направлении.

Так же, как и в первом случае, выберем на гипотенузе треугольника точку  $O$ , в которой сумма всех сил равна нулю. Изобразим линию скольжения (гипотенузу треугольника) линией  $m-t$  и проведем нормаль  $n-n$  в точке  $O$ . Относительно нее отложим линию  $dOd$  под углом  $\rho$ . По этой линии действует вектор реакции  $\bar{T}$ , вызванный внутренним трением материала. Проекция вектора  $\bar{T}$  на плоскости скольжения создает силу, равную  $\mu\sigma_\alpha$ . На плоскости скольжения еще действует эффективное касательное напряжение, которому сопротивляется материал и которое мы принимаем равным касательному напряжению  $k$  — сопротивлению материала сдвигу от сцепления.

Теперь определим суммарный вектор сил, необходимый для преодоления сил сопротивления на плоскости скольжения: сопротивление материала сдвигу  $k$  и фрикционную силу  $\mu\sigma_\alpha$ . Как и в предыдущем случае, проведем вектор  $\bar{k}$  параллельно линии скольжения  $m-t$ .

Вектор внутреннего трения  $\bar{T}$  и вектор сопротивления сдвигу  $\bar{k}$  образуют реактивный вектор  $\bar{L}$ . Для равновесия точки  $O$ , т. е. для преодоления равнодействующей гравитационной и фрикционной сил, необходим горизонтальный вектор  $\bar{N}_x$ , который представляет собой сжимающую поперечную силу и формирует напряжения  $\sigma_x = N_f / \sin \alpha_1$ , численно равные полученным по формуле (6).

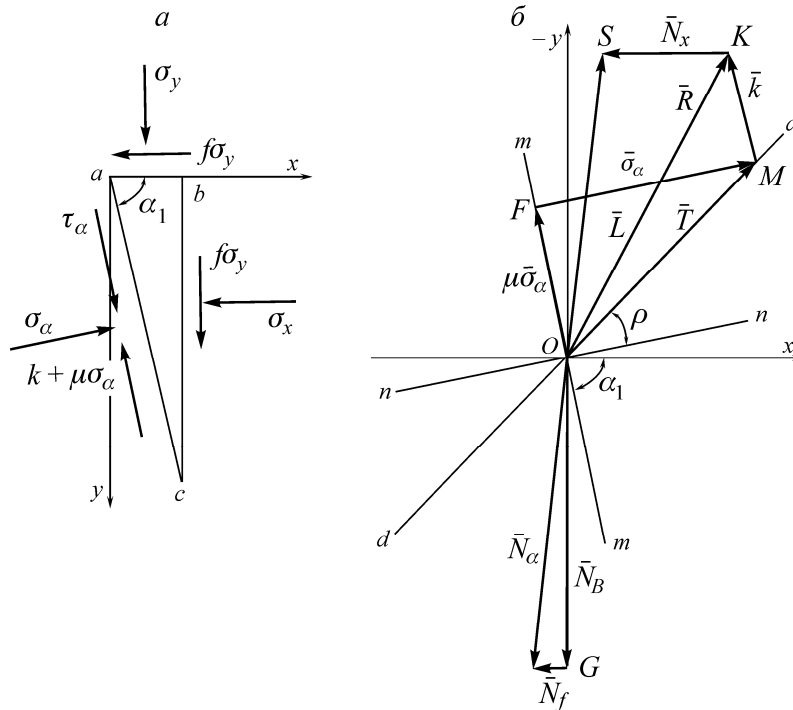


Рис. 2. Векторная диаграмма определения поперечных нормальных сжимающих напряжений при  $\sigma_x < \sigma_y$ : *a* — равновесный элемент; *б* — диаграмма

Аналогичным образом строится диаграмма для гидростатического состояния при  $\sin \rho = \sqrt{1 - b^2}$ . Доказывается равенство  $\sigma_x = \sigma_y$ .

Рассмотрим аномальный случай, когда  $\sigma_x > \sigma_y$  (рис. 3). Расчетные данные:  $k = 1$ ;  $\mu = 1.5$ ;  $f = 1.48$ ;  $\sigma_y = 8.2$ ;  $\sigma_x = 28.3$ ;  $\alpha_1 = 138^\circ$ . По расчетным данным строим суммарный вектор внешних сил  $OP$ . В данном случае угол  $\alpha_1$  линии скольжения определяем по формуле (4), касательное напряжение  $k$  и составляющая от внутреннего трения Кулона  $\mu\sigma_\alpha$  направлены вниз.

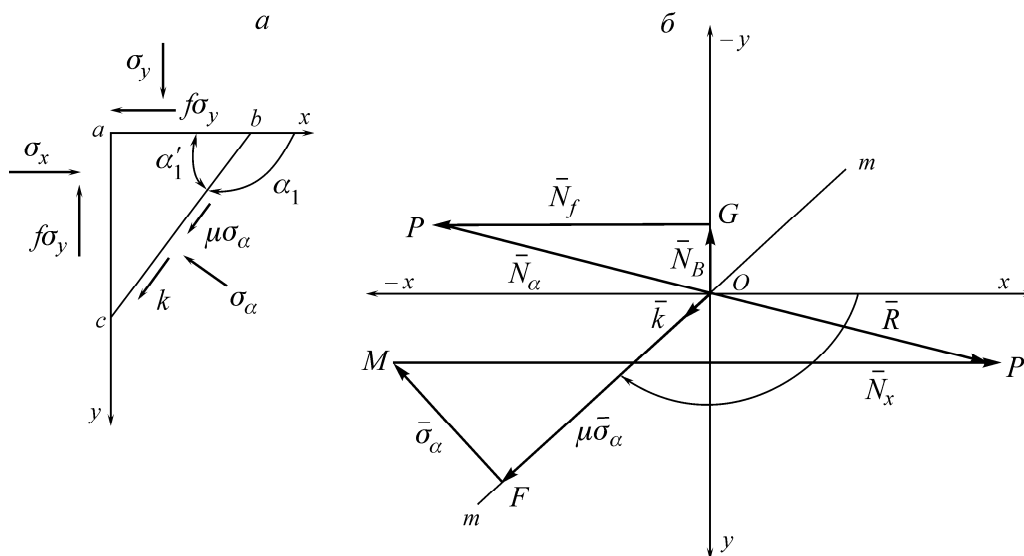


Рис. 3. Векторная диаграмма определения сжимающих горизонтальных нормальных напряжений при  $\sigma_x > \sigma_y$ : *a* — равновесный элемент; *б* — диаграмма

Следует отметить, что суммарный вектор внешних сил направлен вверх. Напрашивается гипотеза о природе горообразования, потому что рассматриваемый элемент перемещается вверх вследствие действия результирующей нагрузки. Для уравнивания результирующего вектора внешней нагрузки  $\bar{R}$ , кроме векторов  $\bar{k}$ ,  $\mu\bar{\sigma}_\alpha$ ,  $\bar{\sigma}_\alpha$ , возникает необходимость введения приращения вектора  $\bar{N}_x$ , возникающего вследствие действия контактных касательных напряжений.

На рис. 4 приведены зависимости напряжений  $\sigma_x$  от физико-механических свойств пород. Нетрудно убедиться, что при одинаковом значении  $\sigma_y = 25$  МПа с увеличением сопротивления сдвигу и угла внутреннего трения напряжения  $\sigma_x$  уменьшаются, а с увеличением  $f$  — возрастают.

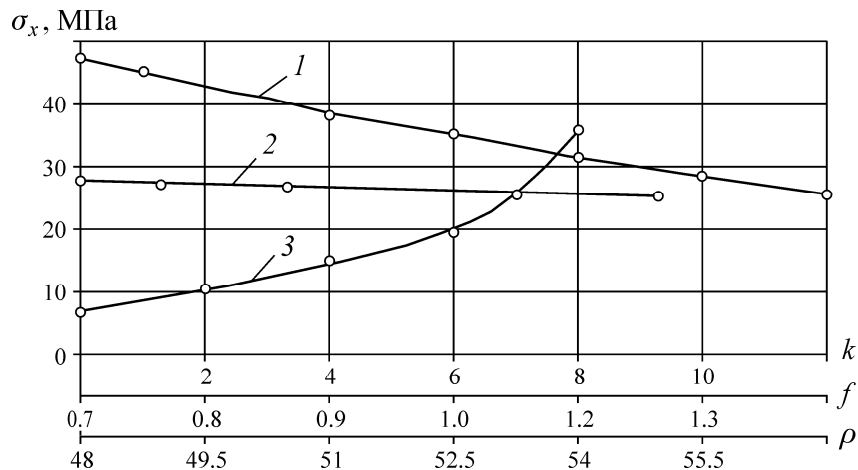


Рис. 4. Зависимости горизонтальных напряжений от параметров физико-механических свойств пород: 1 — от  $k$ ; 2 — от  $\rho$ ; 3 — от  $f$

Из аналитического расчета вытекает, что горизонтальные напряжения формируются касательными от контактного трения между слоями пород, т. е. от сопротивляемости сдвигу.

В некоторых работах, наряду с замерами горизонтальных напряжений, приводятся данные по типу пород между их слоями. Так, в [5] указывается, что в отдельных регионах Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов горизонтальные сжимающие напряжения составляют 80–90 % от вертикальных. Вмещающие породы (кровля и почва) представлены преимущественно глинистыми и песчанистыми сланцами. В кровле пласта Лугутинского залегает аргиллит, а почва представлена слабым аргиллитом, “контакты между слоями заполнены глинистым материалом, вследствие чего связь между отдельными слоями незначительна”. Понятно, что в этих условиях горизонтальные нормальные напряжения не могут превышать вертикальные из-за малого значения сопротивления сдвигу на контакте слоев.

В районах повышенных горизонтальных напряжений Хибинского массива [6] и Горной Шории [7] свойства пород характеризуются высокой крепостью и сцеплением слоев, сцементированных мелкозернистыми материалами. В описании авторов нам не удалось обнаружить слабых глинисто-сланцевых отложений при наличии аномальных  $\sigma_x$ .

Изложенное свидетельствует о том, что механизм формирования горизонтальных напряжений напрямую связан с прочностью контактных зон, с их сопротивлением сдвигу. Приведем еще один пример, связанный с прочностью пород. Как известно, дискообразование при бурении скважин характеризует выбросоопасность песчаника. Установлено, что “связь между тол-



щиной дисков и процентным содержанием кварца в песчаниках приближается к функциональной. Наряду с минеральным составом, на образование дисков оказывает влияние и структура песчаников, причем это явление в некоторых случаях становится определяющим. Одним из структурных показателей песчаников служит протяженность контактов зерен минералов, характеризующая «жесткость» минерального скелета. Экспериментально установлено уменьшение толщины дисков при увеличении протяженности контактов зерен» [8].

В формуле (6) в произведении с коэффициентами трения участвует вертикальное напряжение  $\sigma_y$ , с возрастанием которого  $\sigma_x$  увеличивается. При этом при одинаковых значениях свойств пород нельзя однозначно утверждать, что эта зависимость линейна. Из предоставленных материалов аналитического расчета следует, что горизонтальные напряжения порождают вертикальными, в земной коре — гравитационными.

Теперь сошлемся на работу [2], в которой рассматриваются упомянутые экспериментальные значения напряжений в более глобальном масштабе. «Анализ параметров НДС по скважине СГ-3, полученных различными методами [11], показал, что горизонтальные напряжения качественно и количественно коррелируют с гравитационным полем. Это положение подтверждается по данным немецкой сверхглубокой скважины КТВ [12]. Для глубин 200–800 м в большинстве случаев установлен линейный закон изменения усредненных горизонтальных напряжений с ростом глубины» [2].

Из векторного анализа нами высказана гипотеза, что при аномальных горизонтальных напряжениях формируется горообразование. Этот факт роста продольных деформаций при одноосном сжатии образцов горных пород подтвержден экспериментально в работах [9, 10]. Этот же вывод также отмечен и в статье [2]: «высоконапряженные массивы горных пород характеризуются повышенными градиентами скорости современных поднятий геологических структур, аномальным проявлением горного давления в подземных выработках и даже в скважине».

Возникает естественный вопрос: носит ли формула (6) всеобъемлющий характер? На сегодняшний день у нас нет оснований к такому утверждению. Скажем, что эта одна из точек зрения на часть вопросов, порождаемых деформированием недр Земли. Нельзя исключить возникновение боковых нагрузок вследствие тектонических процессов в недрах Земли, которые могут сформировать высокие значения горизонтальных напряжений, приводящие к горообразованию; катастрофические проявления этих процессов требуют более углубленного изучения.

## ВЫВОДЫ

1. Из уравнения равновесия сил, приложенных к элементу тела согласно положениям теории упругости, получено соотношение для расчета горизонтальных напряжений с учетом физико-механических характеристик ( $k$ ,  $\mu$ ,  $f$ ) горных пород и вертикального напряжения — гравитационного давления. Данное соотношение позволяет обосновать возникновение горизонтальных растягивающих и сжимающих напряжений, меньших и превышающих значения гравитационных, включая и гидростатические, вследствие деформирования слоев горных пород в верхней части земной коры при разработке месторождений полезных ископаемых.

2. Величина горизонтальных напряжений зависит от сопротивляемости сдвигу пород между слоями: при слабых, например глинистых породах, возникают невысокие горизонтальные напряжения, при крепких, например кварцесодержащих, — горизонтальные напряжения превышают гравитационные. Критерием значений горизонтальных напряжений является значение разности синуса угла внутреннего трения и выражения  $\sqrt{1-b^2}$  в формуле (6), которое может быть преобразовано в физические соотношения: при отношении контактных касательных на-

пряжений к сопротивлению материала сдвигу, слагающемуся из сопротивления от сцепления и от внутреннего трения, меньших косинуса внутреннего трения, возникают напряжения  $\sigma_x$ , меньшие гравитационных, при равенстве — гидростатическое состояние ( $\sigma_x = \sigma_y$ ), при больших — напряжения  $\sigma_x$  превышают гравитационные.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Кулаков Г. И. Напряженное состояние породных массивов в верхних слоях земной коры // ФТПРПИ. — 1998. — № 2.
2. Неверов С. А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Ч. 1. Современные представления напряженного состояния массивов горных пород с ростом глубины // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
3. Неверов С. А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Ч. 2. Тектонотипы рудных месторождений и модели геосреды // ФТПРПИ. — 2012. — № 3.
4. Курленя М. В. Результаты экспериментальных исследований напряженного состояния угольных массивов Кузбасса // Напряженное состояние земной коры. — М.: Наука, 1973.
5. Галушко П. Я. и др. Результаты исследования напряжений в массивах горных пород Львовско-Волынского и Донецкого угольных бассейнов // Напряженное состояние земной коры. — М.: Наука, 1973.
6. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах / под ред. акад. М. В. Курлени. — Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1996. — Ч. 1.
7. Шаманская А. Т., Егоров П. В. Соотношение тектонических элементов с полями современных напряжений в Горной Шории // Напряженное состояние земной коры. — М.: Наука, 1973.
8. Забигаило В. Е., Белый И. С. Геологические факторы разрушения керна при бурении напряженных горных пород Донбасса. — Киев: Наук. думка, 1981.
9. Айтматов И. Т. Геомеханика рудных месторождений Средней Азии. — Фрунзе: Илим, 1987.
10. Тажибаев К. Т. Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов. — Фрунзе: Илим, 1989.
11. Горбацевич Ф. Ф., Савченко С. Н. Современные напряжения в северной части Балтийского щита по данным исследования Печенгского геоблока и разреза Кольской сверхглубокой скважины // Геофиз. журн. — 2009. — Т. 31. — № 6.
12. Brudy M., Zoback M. D., Fuchs K., Rummel F., and Baumgaertner J. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength, J. Geophys. Res., 1997, Vol. 102, No. B8.
13. Биргер Н. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1986.
14. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. — М.: Наука, 1990.
15. Крупеников Г. А., Филатов Н. А., Амусин Б. З. и др. Распределение напряжений в породных массивах. — М.: Наука, 1972.

*Поступила в редакцию 10/1 2013*