

*Костюкович Петр Николаевич, д-р техн. наук, проф.  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь*

***Концепция бытового давления дисперсных грунтов с позиций  
законов Кулона и Паскаля***

***The concept of vertical natural pressure of disperse soils from posi-  
tions of Coulomb's law and Pascal law***

На основе сопоставления физических свойств грунтов и паскалевских жидкостей показано, что глубинное распределение соответственно их бытового и гидростатического давления, порождаемое собственным весом среды, подчиняется различным закономерностям: у жидкостей, не обладающих сдвиговой прочностью, это закон Паскаля  $\sigma_p(h) = \gamma h$ ; для грунтов предложена обобщенная нелинейно-сдвиговая модель  $\sigma_\tau(h) = \gamma h^\lambda$ , переходящая в прямолинейно-паскалевскую при  $\lambda = 1$ . Сделан вывод, что проявление бытового давления грунтов в верхней зоне литосферы носит локальный характер, зависит от размеров и формы нижней поверхности его проявления и осуществляется через сдвиговые деформации.

In terms of correlation of physical properties of soils and pascal liquids is shown that intratelluric accommodation of respectively their vertical natural and hydrostatic pressure which is generated by medium's own weight obeys to different mechanisms: for liquids which don't have shear resistance it is Pascal's law  $\sigma_p(h) = \gamma h$ ; for soils it is generalized non-linear shear model  $\sigma_\tau(h) = \gamma h^\lambda$  which transfers to linear-pascal model if  $\lambda = 1$ . There is the conclusion that staining of domestic pressure of soils in overhead zone of lithosphere has a local character and depends on dimensions and form of bottom surface of its staining and is effected through shear deformations.

Геоснования инженерных сооружений в Беларуси представлены исключительно дисперсными грунтами: моренными, флювиогляциальными, аллювием, покровными суглинками и озерноледниковыми образованиями. Сжатие и одновременное уплотнение этих грунтов всегда приводит к соответствующей осадке фундаментов. Прогнозирование данных процессов требует знания закономерностей взаимодействия природного (горного или «бытового») давления от собственного веса грунтовой толщи  $\delta(h) \downarrow$  с дополнительным или избыточным давлением, создаваемым подошвой фундамента. Эта задача особенно актуальна для многослойных толщ. в разрезе которых идет чередование малопрочных водонасыщенных грунтов с переуплотненными моренными.

Как известно, вертикальные бытовые давления грунтов  $\sigma(h) \downarrow$  порождаются их тяжестью. Эти давления оказывают постоянное сжимающее действие на нижележащие слои и потому учитываются при расчетах осадок геоснований и, в частности, при оценке мощности (толщины) активной (сжимаемой) зоны под подошвой фундамента.

Физика формирования и проявления  $\sigma(h) \downarrow$  в условиях их взаимодействия с другими внутренними силами грунтового массива (и прежде всего с силами межчастичного трения и структурного сцепления) пока исследована недостаточно. Может быть поэтому задача о природном давлении дисперсных грунтов получила недопустимо предельное упрощение, которое до сих пор не имеет соответствующего научного обоснования, однако широко применяется и сводится к следующему.

Столб естественного грунта (напр., в форме прямоугольного параллелепипеда высотой  $h$  и единичной площадью основания) условно «вырезается» из своей среды (грунтового массива) и взвешивается; «воздушный» вес этого столба  $\rho gh = \gamma h$  и принимается за бытовое давление грунта на глубине  $h$ . Таким образом, грунт в *гидростатической теории бытовых давлений горных пород* рассматривается как среда без внутреннего структурного сцепления и контактного трения, т.е. как паскалевская жидкость, лишенная сдвиговой прочности, но обладающая плотностью и удельным весом грунта. В итоге осуществляется прямой перенос закона Б. Паскаля о

глубинном распределении гидростатического давления жидкости  $\sigma(h) \downarrow = \sigma_p(h) = \gamma h$  на глубинное распределение бытового давления грунта. Отсюда следует, что *принимаемая в механике грунтов этюра глубинного распределения бытового давления грунтов является гидростатической* [1–4]:

$$\sigma(h) \downarrow = \sigma_p(h) = mg / A = \rho Vg = \gamma h, \quad (1)$$

присущей паскалевским жидкостям, не обладающим сдвиговой прочностью (у этих жидкостей сдвиговые сопротивления отсутствуют ( $\tau(\sigma^*, h) = 0$ ) и потому имеет место закон Б. Паскаля). Здесь

$$\rho = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i \quad \text{и} \quad \gamma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i = \rho g - \quad (2)$$

усредненные по глубине  $h$  величины соответственно плотности и удельного веса грунтов;  $m = \rho V = \rho h$  – масса столба грунта (жидкости – в гидростатике) единичной площади ( $A=1$ ) и высотой  $h$ ;  $\sigma_p(h)$  – бытовое давление грунта на глубине  $h$  в соответствии с прямолинейно-паскалевской моделью. Геометрически функция  $\sigma_p(h) = f(h)$  представляется прямой, которая исходит из начала координат ( $\sigma = h = 0$ ) и обладает угловым коэффициентом (рис. 1):

$$\gamma = \sigma / h = \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что численно  $\gamma = \sigma_0$  при  $h = 1$ , т.е. удельный вес грунта  $\gamma$  можно интерпретировать как бытовое давление грунта  $\sigma_0$  на глубине  $h = 1$ .

В отличие от паскалевских жидкостей дисперсные грунты сжимаемы, обладают сдвиговой прочностью ( $\tau(\sigma^*, h) \gg 0$ ), формируемой внутренним трением ( $\operatorname{tg} \varphi$ ) и структурным сцеплением ( $\tau_0$ ), и потому оказывают огромные сопротивления любым (горизонтальным, вертикальным и т.д.) сдвиговым усилиям и смещениям. По-

этому выделенный столб грунта будет подпираться этими сопротивлениями и в какой-то мере «зависать» в грунтовом массиве, притормаживаясь внутренним трением и структурным сцеплением сжимающихся частиц от «свободного падения». В итоге реальное бытовое давление грунта  $\sigma_\tau(h)$  становится существенно меньше его веса  $\gamma h$ :

$$\sigma_\tau(h) \ll \sigma_p(h) = \gamma h. \quad (4)$$

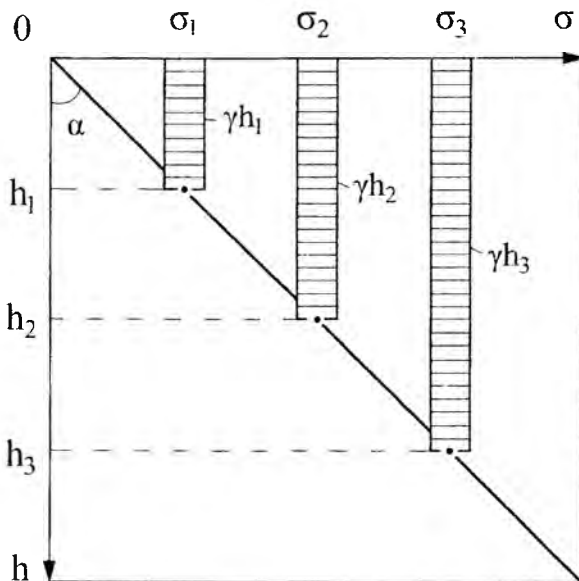


Рис. 1. Графоаналитическое представление паскалевской модели глубинного распределения гидростатического («бытового») давления жидкостей

$$\sigma(h) \downarrow = \sigma_p(h) = \gamma h = (\operatorname{tg} \alpha) h.$$

Пусть сдвиговая прочность грунтового массива на всех глубинах подчиняется закону Кулона:

$$\tau(\sigma^*, h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i(\sigma^*, h) = \tau_0(h) + [tg\varphi(h)]\sigma^*(h), \quad (5)$$

где  $\tau_0(h)$  – удельное сцепление грунта;

$\varphi(h)$  – угол внутреннего трения;

$\sigma^*(h)$  – давление грунтового массива, нормальное сдвигающему вектору.

Когда силы (1) и (5) противоположны, то реальное бытовое давление на глубине  $h$  составит

$$\sigma_\tau(h) = \gamma h - \tau(\sigma^*, h). \quad (6)$$

Представляет интерес решение задачи путем обобщения прямой линейной функции (1):

$$\sigma_\tau(h) = \gamma h^\lambda = \sigma_0 h^\lambda = \sigma_p(h) h^{\lambda-1}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления грунтов их строго вертикальному смещению вниз под действием силы тяжести (является функцией взаимодействия гравитационных и сдвиговых напряжений в результирующем векторе сил, нормальных горизонтальной площадке на данной глубине);

$\sigma_\tau(h)$  – бытовое давление грунта на глубине  $h$  в соответствии с нелинейно-сдвиговой моделью (7). Очевидно, эта модель при  $\lambda = 1$  переходит в закон Паскаля для «бытового» давления жидкости.

С учетом соотношения (4) из (7) получаем, что в грунтовых толщах всегда  $\lambda \ll 1$  (рис. 2).

Зависимости (4)–(7) в той или иной степени отражают физические предпосылки, лежащие в основе существования в ограниченных и неограниченных пространствах грунтовых толщ арочных эффектов, ограниченности по высоте сводов и зон обрушения над горными выработками, устойчивости необсаженных стволов скважин, быстрого затухания скорости и дальности рассеивания дополнительных напряжений под фундаментами и других проявлений

взаимодействия сил тяжести с силами внутреннего трения и сцепления грунтов.

При наличии опытных значений  $\sigma_\tau(h)$ , измеренных на двух и более глубинах, параметр  $\lambda$  целесообразно определять графоаналитически. Для этого следует воспользоваться основным свойством степенной функции (7): в билогарифмической системе координат  $\ln \sigma_\tau(h) = f(\ln h)$  она преобразуется в прямую

$$\ln \sigma_\tau(h) = \ln \gamma + \lambda \ln h = \ln \sigma_0 + \lambda \ln h \quad (8)$$

с начальным отрезком  $\ln \gamma = \ln \sigma_0$  на оси бытовых давлений ( $\ln h = 0$ ) и угловым коэффициентом

$$\lambda = \frac{\ln \sigma_{\tau 2} - \ln \sigma_{\tau 1}}{\ln h_2 - \ln h_1} = \frac{\ln \sigma_\tau - \ln \gamma}{\ln h} = \frac{\ln \sigma_\tau - \ln \sigma_0}{\ln h} = const \quad (9)$$

или

$$\lambda = \ln(\sigma_{\tau 2} / \sigma_{\tau 1}) / \ln(h_2 / h_1) = \ln(\sigma_\tau / \gamma) / \ln h. \quad (9,a)$$

Подставив опытные значения  $\ln \sigma_\tau$  и  $\ln h$  в эти зависимости, легко получить  $\lambda$  и далее вести расчет  $\sigma_\tau(h)$  для других глубин.

Произведем качественную оценку влияния моделей (1) и (7) на глубины распространения активной (сжимаемой) зоны под подошвой фундамента  $h_{ap}$  и  $h_{at}$ , определяемые с учетом закономерностей формирования бытовых давлений соответственно (1) и (7). Положим:  $h_0$  – глубина залегания подошвы фундамента;  $\sigma_f(h_0)$  – давление на уровне подошвы фундамента, создаваемое весом инженерного сооружения и самого фундамента;  $\sigma_e(h_0)$  – бытовое давление грунта на глубине  $h_0$  (равно  $\sigma_p(h_0)$  или  $\sigma_\tau(h_0)$  в моделях соответственно (1) или (7));  $\sigma_e(h_0) = \sigma_{e0} = \sigma_f(h_0) - \sigma_n(h_0)$  – дополнительное или эффективное давление подошвы фундамента, принимаемое в расчетах его осадок (равно  $\sigma_{ep} = \sigma_f(h_0) - \sigma_p(h_0)$  или  $\sigma_{et} = \sigma_f(h_0) - \sigma_\tau(h_0)$ )

соответственно с учетом бытового давления по (1) или (7);  $\alpha$  – функция рассеивания по глубине эффективного давления  $\sigma_e(h_0)$  [1–4].

Будем исходить из допущения, что на глубинах  $h_{ap}$  и  $h_{at}$ , т.е. у основания активной зоны, эффективное давление от подошвы фундамента составляет  $\beta$ -ю долю бытового (напр.,  $\beta = 20\%$ ). Кроме того, положим, что на уровне подошвы фундамента  $\sigma_p(h_0) = \sigma_\tau(h_0)$  и  $\sigma_e(h_0) = \sigma_{e0}$ . Тогда можем записать:

$$\sigma_e(h_{ap}) = \beta \gamma h_{ap} = \alpha(h_{ap}) \sigma_{e0}; \quad (10)$$

$$\sigma_e(h_{at}) = \beta \gamma h_{at}^\lambda = \alpha(h_{at}) \sigma_{e0}, \quad (11)$$

откуда находим

$$h_{at} = \left[ \frac{\alpha(h_{at})}{\alpha(h_{ap})} h_{ap} \right]^{1/\lambda}. \quad (12)$$

Поскольку  $\lambda \ll 1$ , то из (12) имеем, что в грунтовых толщах всегда

$$h_{at} \gg h_{ap}. \quad (13)$$

Эта разница в мощностях активной зоны возникает из-за того, что на любой глубине  $h$  имеет место соотношение (4), т.е. существует превышение паскалевских бытовых давлений  $\delta_p(h)$  над сдвиговыми  $\delta_\tau(h)$ . Данное превышение найдем, вычитая (7) из (1):

$$\Delta\sigma(h) = \sigma_p(h) - \sigma_\tau(h) = \gamma h (1 - h^{\lambda-1}) = \sigma_p(h) (1 - h^{\lambda-1}). \quad (14)$$

Существование разницы бытовых давлений  $\Delta\sigma(h)$ , не участвующих в сжатии грунтовой толщи и формировании ее активной зоны, может становиться одной из главных причин возникновения

значительных погрешностей при оценке несущей способности геос-  
оснований и, как следствие, величины осадки фундамента.

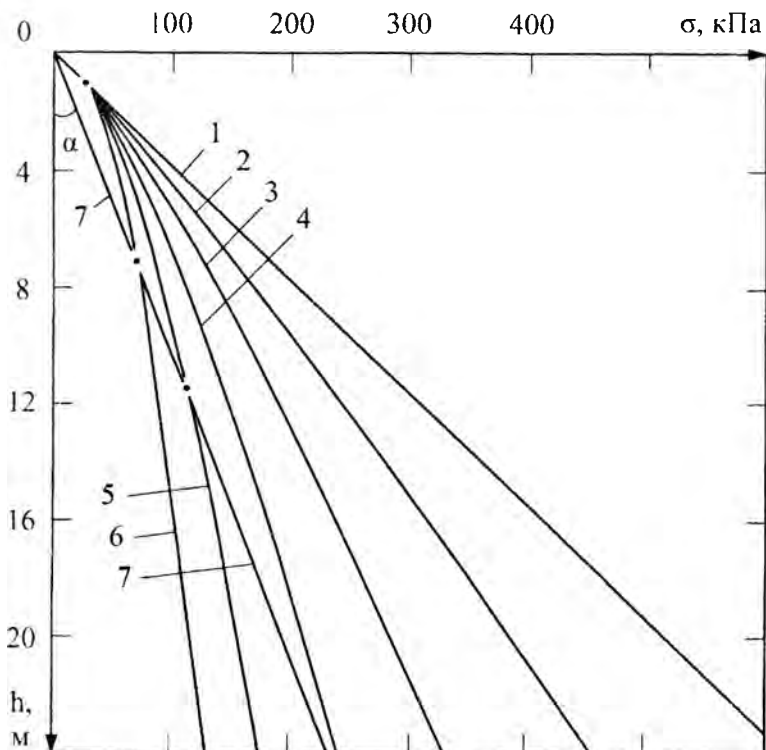


Рис. 2. Распределение по глубине  $h$  бытовых давлений  $\sigma(h) \downarrow$  тяжелой супеси (графики 1...6) по гидростатической ( $\sigma(h) \downarrow = \gamma h$ ,  $\gamma = 26,0 \text{ кН/м}^3$ , прямая 1) и нелинейно-сдвиговой ( $\sigma(h) \downarrow = \gamma h^\lambda$ ,  $\gamma = 26,0 \text{ кН/м}^3$ ,  $\lambda < 1$ , кривые 2...6) моделям: 1...6 – значения  $\lambda$  равны соответственно 1,0; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; и 0,5; прямая 7 – распределение по глубине гидростатического («бытового») давления воды по закону Б. Паскаля  $\sigma(h) \downarrow = \gamma h$ , где  $\gamma = \sigma / h = \text{tg} \alpha = 9,81 \text{ кН/м}^3$ . Параметры супеси:  $\rho_S = 2,65$ ;  $\rho_d = 1,80$  и  $\rho = 2,03 \text{ г/см}^3$ ;  $\gamma = 26,0 \text{ кН/м}^3$ ;  $W = 12,8\%$ ;  $J_p = 4,4\%$ ;  
 $\tau = 0,33 + 0,475\sigma$ ,  $\text{кг/см}^2$



Итак, выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В современной механике грунтов теоретическая и проектная оценка бытового давления дисперсных сред осуществляется по модели (1)  $\sigma_p(h) = \gamma h$ . Показано, что эта модель в действительности справедлива только для паскалевских жидкостей, лишенных внутреннего трения и структурного сцепления и потому не обладающих сдвиговой прочностью. Именно поэтому закономерность (1) следует из закона Б.Паскаля и отражает глубинное распределение гидростатического («бытового») давления этих жидкостей. На этом основании модель (1) названа *прямолинейно-паскалевской*.

2. Дисперсные грунты, в отличие от паскалевских жидкостей, обладают значительной сдвиговой прочностью, обусловленной их внутренним трением и сцеплением. Поэтому виртуально выделенный в грунтовом массиве столб грунта единичной площади и высотой  $h$  никогда не будет «свободно падать» в грунтовом массиве и оказывать на эту площадь бытовое давление, равное собственному весу  $\gamma h$ . Отсюда следует, что *реальное бытовое давление дисперсных грунтов всегда меньше паскалевского  $\sigma_p(h)$  и является функцией взаимодействия сил тяжести грунта с силами его внутреннего трения и сцепления*. Это значит, что проявление бытового давления грунтовых толщ, в отличие от паскалевских жидкостей, всегда носит локальный характер и осуществляется только через сдвиговые и уплотняющие деформации, т.е. путем преодоления кулоновских сопротивлений. Отсюда заключаем: *бытовое давление представляет собой результирующий вектор взаимодействия двух основных сил: сил тяжести некоторой ограниченной области (напр., геоснования, свода или призмы обрушения) с силами сопротивления сдвигу на внешней поверхности этой области*; очевидно, если кулоновские силы этих поверхностей не меньше сил тяжести самих областей, то бытовое давление последних вообще не сможет проявиться.

3. Существование соотношения (4) ставит задачу отыскания таких функций (теоретических или эмпирических), которые описывали бы глубинное распределение бытового давления грунтов с мак-

симальной точностью (прежде всего в многослойных геосложениях). Поскольку теория бытового давления грунтов далека до завершения, а натурные измерения этого давления отсутствуют, то целесообразно развивать различные концепции решения проблемы. С данных позиций определенным интерес вызывает степенная функция (7), представляющая обобщенную модель паскалевского распределения давлений.

4. Предлагаемая *нелинейно-сдвиговая* модель глубинного распределения бытового давления грунтов (7) во многих отношениях заслуживает внимания и особенно с позиции ее принципиального отличия от господствующей в механике грунтов прямолинейно-паскалевской модели (1). В основе отличия лежат два главных фактора: нелинейность модели (7), зависящая от соотношения гравитационных и сдвигающих напряжений в результирующем векторе сил, и совершенно различная физика сред: сжимаемость грунтов и наличие у них значительной сдвиговой прочности – с одной стороны, и полное отсутствие этих свойств у паскалевских жидкостей – с другой.

5. Объективная оценка бытового давления грунтов до тех пор не будет достигнута, пока не будут решены две основные задачи: во-первых, не станут известны законы взаимодействия силы тяжести геосложения с силами сдвиговых сопротивлений на его внешней поверхности и, во-вторых, пока не появятся результаты измерений этого давления на различных глубинах и в различных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях. Поэтому целесообразно ввести в нормативы по инженерно-геологическим изысканиям положение о необходимости выполнения полевых опытов по исследованию бытового давления грунтов будущих геосложений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов, В.С. Основания и фундаменты / В.С. Кириллов. – М.: Транспорт, 1980. – 392 с.
2. Костерин, Э.В. Основания и фундаменты / Э.В. Костерин. – М.: Высшая школа, 1990. – 432 с.
3. Механика грунтов / под ред. Б.И. Далматова. – Москва–Санкт-Петербург, 2000. – Ч. 1. Основы геотехники. – 204 с.
4. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – 280 с.