

УДК 624.131

П. Н. Костюкович, д-р техн. наук, проф.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЗВЕШЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ

В работе систематизированы современные представления о действии взвешивающих гидростатических сил в водонасыщенных грунтах и дана концептуальная оценка вытекающим из них расчетным методам определения взвешивающего действия поровых вод. Показано, что эти методы содержат принципиальные несоответствия с физикой проявления гидростатических сил в пористых средах и, в частности, с ролью негравитационных поровых вод (кристаллизационных, прочно- и рыхлосвязанных, микрокапиллярных и т. д.), формирующих межчастичные пространства без точек приложения паскалевских сил и потому не передающих гидростатического давления. В рамках современных представлений рассмотрено влияние архимедовых сил не только на плотность частиц, скелета и грунта в целом, но и на объемные фазовые характеристики водонасыщенного грунта; поставлены задачи для дальнейших исследований.

Территория Беларуси покрыта мощным чехлом осадочных отложений ледникового комплекса антропогена. Толща насыщена подземными водами. Поэтому геоснования, как правило, или подвержены циклическому воздействию капиллярной каймы, или расположены в зоне колебания уровня грунтовых вод (УГВ), т. е. периодически становятся или водонасыщенными, располагаясь ниже УГВ, или затопленными, залегая под слоем воды (например, в реках, каналах, водоемах и т. д.).

Прочность и несущая способность таких геоснований определяются с учетом действия *взвешивающих или архимедовых сил*

$$F(A) = F(\uparrow) - F(\downarrow), \quad (1)$$

оказываемых поровыми водами на дисперсные частицы и скелет грунта, уменьшая их массу и плотность. Здесь $F(\uparrow)$ и $F(\downarrow)$ – силы гидростатического давления соответственно на *выталкивающей* (нижней) и *потопляющей* (верхней) поверхности минеральных частиц.

При анализе рассматриваемой проблемы будем исходить из допущения, что водонасыщенные грунты – это двухфазные системы, в которых существует два вида межфазовых взаимоотношений: *од-*

нофазовые или межчастичные и *межфазовые* «поровая вода – частицы». Межчастичные имеют место тогда, когда минеральные частицы, слагающие скелет грунта, частью своей поверхности соприкасаются между собой, образуя множество контактных поверхностей и пространств, нередко содержащих связанную влагу.

Межфазовые связи, в отличие от однофазовых, осуществляются преимущественно через объемы или пространства. Последние не обладают идеальными геометрическими формами, которые присущи модельным грунтам, а представлены неправильной формы капиллярами, каналами, щелями, ходами, отверстиями и другими видами сквозных, закрытых и тупиковых пустот или пор, заполненных водой.

С позиции гидростатики находящиеся в контактных и межфазовых пространствах поровые воды можно разделить на *гравитационные* или свободные, передающие гидростатическое давление и подчиняющиеся законам Паскаля и Архимеда, и *негравитационные* или адсорбированные, не передающие гидростатического давления и потому не подвластные законам гидравлики и фильтрации [3].

К негравитационным водам будем

относить кристаллизационные, связанные, осмотические, микрокапиллярные и другие разновидности вод атомного, ионного и молекулярного взаимодействия с минеральными частицами грунта. Поровые пространства, содержащие эти воды, ограничены строго определенными размерами, которые по сути являются нижним пределом или *нижней границей проявления гравитационных сил*. Эти размеры зависят от многих факторов, но прежде всего от дисперсности и текстуры грунта, геометрической формы и минералогического состава частиц, шероховатости контактирующих поверхностей, гидрохимии поровых вод и т. д., т. е. в целом – от *уровня ионно-молекулярного взаимодействия воды со скелетом*.

Исходя из толщины водных пленок, составляющих основную долю максимальной молекулярной влагоемкости грунтов, можно полагать, что *глубина контактных пространств, заполненных негравитационными водами, равна удвоенной толщине водных пленок, составляющих максимальную молекулярную влагоемкость грунта*, и в первом приближении достигает 0,01...0,10 мм. Такие контакты между частицами водонасыщенного грунта по аналогии с заключенными в них поровыми водами будем называть *негравитационными*, а контактные пространства толщиной более 0,01...0,10 мм, заполненные свободными водами и являющиеся проводниками гидростатического давления, – *гравитационными*. Отсюда следует, что *в водонасыщенных грунтах, диаметры d пор которых находятся за предельной границей проявления гравитационных сил ($d < 0,01...0,10$ мм), точки приложения гидростатического давления отсутствуют и взвешивающее действие поровых вод не имеет места*.

Возникновение негравитационных контактов-щелей между минеральными частицами водонасыщенного грунта указывает на существование в этих грунтах поровых пространств, недоступных гравитационным силам воды. Этот факт су-

щественно усложняет подчинение всех поровых вод гидростатическим законам. И прежде всего потому, что на поверхности контактных зон начинают формироваться далекодействующие молекулярные силы взаимного притяжения, прижимающие одну частицу к другой. В результате в водонасыщенном грунте создаются антигравитационные условия для полного или частичного исчезновения точек приложения архимедовых сил и начинается проявление *эффекта гидростатического прижатия или присасывания* между минеральными частицами с одной стороны и между частицами и дном с другой. Эти явления в механике грунтов не изучены. В то же время они могут существенно ограничивать область проявления архимедовых сил в дисперсных средах и в итоге приводить не к частичной потере веса их скелета, а, наоборот, к его «утяжелению» и дополнительному уплотнению.

Для исследования этих вопросов запишем известные балансовые равенства по объемам и «воздушным», т. е. измеренным в воздухе, массам твердой (V_1, q_1) и жидкой ($V_{2sat} = V_{II}, q_{2sat}$) фаз водонасыщенного грунта [2–6]:

$$V = V_1 + V_{II} = V_1 + V_{2sat} = V_1 + V_{2a} + V_{2g}; \quad (2)$$

$$q_{sat} = q_1 + q_{2sat} = q_1 + q_{2a} + q_{2g}, \quad (3)$$

где измеренные в воздухе массы: q_1 – твердых частиц объемом V_1 или абсолютно сухого грунта (его скелета) объемом V ; $q_{2sat} = q_{sat} - q_1 = q_{2a} + q_{2g}$ – поровой воды объемом $V_{2sat} = V_{2a} + V_{2g} = V_{II}$; q_{sat} – водонасыщенного грунта объемом V ; q_{2a} и q_{2g} – соответственно адсорбированной объемом V_{2a} и гравитационной объемом V_{2g} поровой воды; $V_{II} = V - V_1$ – объем пор в грунте.

Именно водонасыщенные поры как важнейший элемент дисперсных

грунтов вносят принципиальные отличия в физику и механику проявления и распределения гидростатического давления при рассмотрении $F(A)$ в двух совершенно различных средах:

1) **вне пористой среды**, т. е. при нахождении тела (тонущего, лежащего на дне, соприкасающегося с дном и т. д.) в достаточно большом объеме гравитационной воды

$$V_{2g} \gg V \text{ или } V_{2g} \gg V_1; \quad (4)$$

2) **внутри пористой среды**, где, во-первых, объем гравитационных вод

$$V_{2g} = V_{2sat} - V_{2a} = V_{II} - V_{2a} = \mu V \quad (5)$$

сопоставим ($V_{2g} \approx V_1$) или существенно меньше ($V_{2g} \ll V_1$) объема твердых частиц, и, во-вторых, имеет место множество пор и межчастичных контактов, содержащих исключительно адсорбированные воды

$$V_{2a} = V_{II} - V_{2g} = (n - \mu)V = \beta V, \quad (6)$$

которые не передают гидростатического давления и не создают взвешивающих сил $F(\uparrow)$. Здесь $\mu = V_{2g}/V$, $\beta = V_{2a}/V$ и $n = V_{II}/V$ – коэффициенты водоотдачи, максимальной молекулярной влагоемкости (адсорбированности) и пористости грунта соответственно.

Из (2) и (3) получаем, что обобщенную или интегральную плотность поровых вод ρ_w можно выразить через истинные плотности адсорбированных ($\rho_a = q_{2a}/V_{2a}$) и гравитационных ($\rho_g = q_{2g}/V_{2g}$) вод зависимостью

$$\begin{aligned} \rho_w &= q_{2sat}/V_{2sat} = f(a)\rho_a + f(g)\rho_g = \\ &= \rho_a - f(g)(\rho_a - \rho_g), \end{aligned}$$

где $f(a)$ и $f(g)$ – объемные доли адсорби-

рованных и гравитационных вод в водонасыщенном грунте соответственно:

$$f(a) = V_{2a}/V_{2sat};$$

$$f(g) = V_{2g}/V_{2sat} = \mu(1 + 1/e);$$

очевидно, $f(a) + f(g) = 1$

Современная методология оценки взвешивающего действия поровых вод на скелет водонасыщенного грунта изложена в [1, 8–10]. Анализ этой методологии показывает, что она обладает принципиальными упущениями. Во-первых, допускается прямое использование закона Паскаля и соответственно Архимеда для водонасыщенного грунта независимо от его пористости, дисперсности, минералогического состава, содержания в нем гравитационной воды и соотношения между объемами твердых частиц и гравитационных вод; при этом, естественно, за объем вытесненной воды, весу которой равна взвешивающая сила $F(A)$, принимается не объем содержащейся в грунте гравитационной воды V_{2g} , а суммарный объем твердых частиц V_1 . К примеру, Н. М. Герсевич по этому вопросу пишет: «... мы должны принимать плотность частиц водонасыщенного грунта ρ'_s , равной $\rho_s - \rho_w = \rho_s - 1$, т. е. считать вес грунта облегченным вытесненным им объемом воды, хотя бы речь шла о глине в вязком или полутвердом состоянии» [1, С. 17].

В последующем в понимание и решение данной проблемы были внесены существенные дополнения и уточнения. Например, Н. Н. Маслов, рассматривая вопрос «о взвешивании грунтов ниже УГВ», приходит к такому выводу: «Как и всякое тело, погруженный в воду грунт теряет в весе. Понятно, что взвешивающее воздействие воды проявляется лишь по отношению к зернам, слагающим грунт... Поэтому вопрос о собственном весе песчаного, гравелистого или галечного грунтов в различных состояниях разрешается

очень просто. Гораздо менее определенным представляется этот вопрос для тонкозернистых связных грунтов (глин, суглинков, тонких супесей и т. п.). Из-за их тонкозернистого сложения, особых физических свойств воды, заключенной в мельчайших порах породы, где она ведет себя почти как твердое вещество, и возможного наличия в порах так называемого заземленного воздуха, непосредственное использование выражений

$$\begin{aligned}\rho_d &= (1-n)\rho_s; \\ \rho'_d &= (1-n)(\rho_s - \rho_w); \\ \rho_{sat} &= \rho_d + \rho_w n\end{aligned}\quad (7)$$

для этого рода грунтов не во всех случаях возможно. Поэтому для глинистых грунтов и пород в качестве исходного принято считать их плотность в состоянии естественной влажности с учетом веса воды, заключенной в порах» [8, С. 331]. Здесь ρ_w – обобщенная плотность поровой воды в воздухе (принимается равной плотности непоровой гравитационной воды в $1 \text{ г/см}^3 = 1 \text{ т/м}^3$), $\rho_w = q_{2sat} / V_{2sat}$; ρ_d – плотность абсолютно сухого грунта (его скелета) в воздухе, $\rho_d = q_1 / V$; ρ'_d – «плотность грунта под водой с учетом взвешивающего воздействия воды, $\rho'_d = q'_1 / V$; ρ_{sat} – плотность грунта в водонасыщенном состоянии, но без учета взвешивающего воздействия воды, $\rho_{sat} = q_{sat} / V$ » [8].

Как видим, водонасыщенное состояние грунта оценивается исключаящими друг друга моделями: с учетом (грунт в воде) и без учета (грунт в воздухе) взвешивающего действия поровых вод. И это несмотря на то, что **в водонасыщенном грунте взвешивающее действие гравитационных вод V_{2g} проявляется всегда, т. е. имеет место независимо от того, в какой среде (в воде или в воздухе) находится водонасыщенный грунт.** Поэтому если одна из данных моделей верна, то

другая будет ошибочной. Такое положение в оценке взвешивающего действия поровых вод $F(A)$ обусловлено многими факторами, но прежде всего **отсутствием способов измерения $F(A)$.**

В третьем допущении при оценке $F(A)$ принимается, что каждая частица водонасыщенного грунта обладает нижней (архимедовой) поверхностью, т. е. точками приложения выталкивающих гидростатических сил $F(\uparrow)$. Это значит, что твердые частицы рассматриваются как отдельные затопленные тела, не обладающие контактами и другими видами взаимодействия с соседними телами и прежде всего ниже расположенными. В итоге **водонасыщенный грунт приравнивается к разжиженному, в котором твердые частицы находятся во взвешенном состоянии и независимы друг от друга.**

Таким образом, в механике грунтов одна из фундаментальных задач по оценке особенностей проявления взвешивающих сил, оказываемых гравитационными водами пор на скелет водонасыщенного грунта, сводится к совершенно нереальной, которая, естественно, исследуется в традиционной, архимедовой постановке: оценивается не взвешивающее действие весьма ограниченного объема гравитационных поровых вод на скелет водонасыщенного грунта, а, наоборот, действие бесконечного объема воды на помещенный в нее скелет как отдельное тело. Для этого образец водонасыщенного грунта объемом $V = V_1 + V_{II}$ условно «вырезается» из пласта грунтовых вод и далее рассматривается как однофазное, т. е. обезвоженное, тело-скелет; сухой скелет погружается в воду. Поскольку объем вытесненной им воды равен суммарному объему твердых частиц V_1 , то на этой основе, в соответствии с законом Архимеда, рассчитываются: относительно объема V_1 – **«плотность твердых частиц в воде»**

$\rho'_s = q'_1/V_1$ и относительно всего объема водонасыщенного грунта V – «**плотность скелета взвешенного в воде грунта**» $\rho'_d = q'_1/V$, облегченного весом вытесненной им воды» [1, 8–10].

Опираясь на эти положения, обобщим современные представления о влиянии взвешивающих сил $F(A)$ на массу и плотность фазовых характеристик водонасыщенного грунта. Результаты этих исследований будут весьма полезными для дальнейшего изучения рассматриваемой проблемы.

В соответствии с теорией линейной фазовой модели [2, 5, 6] масса q_{sat} и плотность $\rho_{sat} = q_{sat}/V$ водонасыщенного грунта принимают максимальные значения (по сравнению с фазовыми состояниями при меньших влажностях):

$$\begin{aligned} \rho_{sat} &= q_{sat}/V = (q_1 + q_{2sat})/V = \\ &= \rho_d(1 + W_{sat}) = \rho_d + \rho_w n, \end{aligned} \quad (8)$$

где W_{sat} – полная влагоемкость водонасыщенного грунта, измеренная в воздухе, $W_{sat} = q_{2sat}/q_1$.

Наличие межчастичных гравитационных пространств и приводит к тому, что на смоченных поверхностях минеральных частиц формируются условия для появления **точек приложения гидростатических сил**. В этой связи будем исходить из допущения, что поровое пространство водонасыщенного грунта $V_{II} = V_{2sat}$ является гравитационным. Иначе говоря примем модель, в которой все поры заполнены гравитационной водой и представляют собой единую водную систему, где каждая частица находится под воздействием паскалевских сил. Тогда взвешивающая или подъемная сила $F(A)$, приложенная к нижней поверхности частиц скелета, будет равна весу вытесненной скелетом воды в объеме твердых частиц V_1 :

$$F(A) = g\rho_w V_1, \quad (9)$$

где g – ускорение силы тяжести.

В соответствии с (9) масса взвешенного поровой водой скелета

$$q'_1 = q_1 - \rho_w V_1 \quad (10)$$

становится кажущейся и уменьшается на величину $\rho_w V_1$, равную массе вытесненного объема воды V_1 . Поэтому **величина q'_1 называется взвешенной (нередко эффективной) массой скелета и твердых частиц**.

Существование q'_1 влечет за собой изменение «воздушных» массы и плотности фазовых характеристик, связанных с q'_1 . В частности, появляются **взвешенные плотности** твердых частиц в воде [10]:

$$\rho'_s = q'_1/V_1 = (q_1 - \rho_w V_1)/V_1 = \rho_s - \rho_w, \quad (11)$$

скелета в воде ρ'_d и самого водонасыщенного грунта в воде $\rho'_{sat} = q'_{sat}/V$.

Поскольку

$$\begin{aligned} q_1 &= q_{sat} - q_{2sat}; \\ q_{2sat} &= \rho_w V_{2sat}; \\ V_{2sat} &= V_{II} = V - V_1, \end{aligned} \quad (12)$$

то:

с учетом (10)

$$\begin{aligned} \rho'_d &= q'_1/V = (q_1 - \rho_w V_1)/V = \\ &= \rho_d - \rho_w(1 - n) = \rho_d(1 - \rho_w/\rho_s); \end{aligned} \quad (13)$$

с учетом (8)

$$\begin{aligned} \rho'_d &= (q_{sat} - q_{2sat} - \rho_w V_1)/V = \\ &= (q_{sat} - \rho_w V_{II} - \rho_w V_1)/V = \rho_{sat} - \rho_w; \end{aligned} \quad (14)$$

с учетом (12) [8, 9]

$$\begin{aligned} \rho'_d &= (q_1 - \rho_w V_1)/(V_1 + V_{II}) = \\ &= (q_1/V_1 - \rho_w)/(1 + V_{II}/V_1) = \\ &= (\rho_s - \rho_w)/(1 + e) = \\ &= (\rho_s - \rho_w)(1 - n) = \rho_d(\rho'_s/\rho_s), \end{aligned} \quad (15)$$

где e – коэффициент пористости:

$$e = V_{II} / V_1 = n / (1 - n) = \rho_s / \rho_d - 1. \quad (16)$$

Из (15) находим, что **отношение плотностей скелета ρ'_d и твердых частиц ρ'_s водонасыщенного грунта в воде равно их отношению в воздухе:**

$$\begin{aligned} \rho'_d / \rho'_s &= \rho_d / \rho_s = 1 - n = \\ &= 1 / (1 + e) = m = V_1 / V = const, \quad (17) \end{aligned}$$

где m – зернистость (уплотненность) грунта.

Существование взвешивающих гидростатических сил в водонасыщенном грунте $F(A)$ и соответственно эффективных ρ'_s и ρ'_d возможно при допущении, что водонасыщенный грунт – это **пористое тело в воде** (условие (4)). В действительности водонасыщенный грунт – это достаточно ограниченный объем гравитационных вод V_{2g} в пористом теле, объем твердых частиц которого V_1 сопоставим или превышает V_{2g} , т. е.

$$V_1 \geq V_{2g} \quad \text{или} \quad V_1 \gg V_{2g}, \quad (18)$$

в песчано-гравийных и тонкодисперсных (глинистых, торфяных, илистых и т. д.) грунтах соответственно.

Предполагая, что объем гравитационных вод V_{2g} достаточен для создания взвешивающих сил $F(A)$ на обе фазы водонасыщенного грунта, находим эффективную массу этого грунта (массу в воде):

$$q'_{sat} = q_{sat} - \rho_w V. \quad (19)$$

Разделив (19) на объем грунта V , получим эффективную плотность водонасыщенного грунта (его плотность в воде) [10]:

$$\rho'_{sat} = \rho_{sat} - \rho_w. \quad (20)$$

При погружении водонасыщенного

грунта в воду вытесняется объем воды V , равный объему этого грунта V . Тогда, учитывая (11)–(15) и тот факт, что масса вытесненной поровыми водами воды $\rho_w V_{II}$ равна массе поровых вод (при условии равенства их плотностей), имеем:

$$\begin{aligned} \rho'_{sat} &= q'_{sat} / V = (q'_1 + q'_{2sat}) / V = \\ &= [(q_1 - \rho_w V_1) + (q_{2sat} - \rho_w V_{II})] / V = \\ &= (q_1 - \rho_w V_1) / V = \rho_d - \rho_w (1 - n). \quad (21) \end{aligned}$$

Таким образом, если поровая вода является гравитационной, то при погружении водонасыщенного грунта в воду масса его поровой воды становится равной нулю, т. е.

$$q'_{2sat} = q_{2sat} - \rho_w V_{II} = 0, \quad (22)$$

и оказывается в невесомости (как известно, в гравитационном поле невесомость «исчезает» в условиях «среда в своей среде» и «возникает» в условиях «среда в другой среде»). Этим свойством «вода в воде», «плазма в плазме» и т. д. широко пользуются, например, рыбы путем изменения своего объема V_R за счет воздуха (его плотность $\rho_V = 0,001293 \text{ г/см}^3$). В этом случае условие невесомости следует из того же равенства «воздушных» масс затопленного тела и вытесненной им воды:

$$\rho_R V_R + \rho_V (\Delta V_V) = \rho_w (V_R + \Delta V_V), \quad (23)$$

где ρ_R – «воздушная» плотность рыбы, $\rho_R = q_R / V_R$; q_R – масса рыбы на воздухе; ΔV_V – объем воздуха, изменяющий объем рыбы V_R .

Из (23) получаем относительное изменение объема рыбы в период ее невесомости:

$$\frac{\Delta V_V}{V_R} = -\frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_V} + \left(\frac{1}{1 - \rho_V / \rho_w} \right) \frac{\rho_R}{\rho_w}. \quad (24)$$

График функции $\Delta V_V / V_R = f(\rho_R / \rho_w)$ представляет собой прямую с начальным отрезком $\rho_w / (\rho_w - \rho_v) \approx 1$ и угловым коэффициентом $[1 / (1 - \rho_v / \rho_w)] \approx 1$.

Именно формула (24) отражает влияние плотности воздуха ρ_v , а следовательно, и погоды на создание неудобств и дискомфорта в стремлении рыб к состоянию невесомости.

Альтернативными «природному» способу достижения невесомости в воде являются искусственные, основанные на регулировании массы затопленного тела или плотности жидкости, а также на комбинациях всех трех способов.

Из (14) и (20) получаем важнейшее свойство водонасыщенного грунта, находящегося в воде: **эффективная плотность водонасыщенного грунта ρ'_{sat} равна эффективной плотности его скелета ρ'_d** :

$$\begin{aligned} \rho'_{sat} = \rho'_d = \rho_{sat} - \rho_w &= (1 - n)(\rho_s - \rho_w) = \\ &= \rho_d(1 - \rho_w / \rho_s) = \rho_d - \rho_w(1 - n), \end{aligned} \quad (25)$$

откуда следует, что **действие взвешивающих сил $F(A)$ на скелет водонасыщенного грунта равно их действию на весь грунт**.

В [2–7] доказано, что все три плотности грунта ρ , ρ_d , ρ_s являются базовыми или основными фазовыми характеристиками, по которым рассчитываются и через которые выражаются остальные (производные) фазовые характеристики. Таким образом, имея эффективные значения плотностей «водонасыщенного грунта в воде» ρ'_s , ρ'_d и ρ'_{sat} , можно определить влияние архимедовых сил $F(A)$ на его производные фазовые характеристики. При этом, очевидно, «воздушная» полная влагоемкость грунта

$$W_{sat} = q_{2sat} / q_1 \quad \text{и} \quad W_{0sat} = (\rho_d / \rho_w) W_{sat} \quad (26)$$

при его нахождении в воде под воздейст-

вием взвешивающих сил принимает нулевое значение

$$W'_{sat} = \frac{q'_{2sat}}{q'_1} = 0 \quad \text{и} \quad W'_{0sat} = \frac{\rho'_d}{\rho'_w} W'_{sat} = 0, \quad (27)$$

т. е. становится «невесомой», поскольку, согласно (22), масса затопленной поровой воды $q'_{2sat} = 0$ (естественно, при равенстве плотностей поровой и выталкивающей вод). Это явление (особенно при неравенстве плотностей поровых и выталкивающих гравитационных вод) имеет фундаментальное значение в **теории взвешивающего действия грунтовых вод** и должно учитываться при переносе «воздушных» влажностей лабораторных образцов на водонасыщенное состояние геоснований [4].

Выясним влияние $F(A)$ на поведение объемных характеристик водонасыщенного грунта, рассчитываемых с использованием ρ'_d и ρ'_s . В этом случае эффективная пористость водонасыщенного грунта в воде n' , определяемая с учетом выталкивающего действия гравитационных вод, будет равна

$$\begin{aligned} n' &= 1 - \rho'_d / \rho'_s = 1 - \\ &- (\rho_{sat} - \rho_w) / (\rho_s - \rho_w) = \\ &= (\rho_s - \rho_{sat}) / (\rho_s - \rho_w). \end{aligned} \quad (28)$$

В (28) вместо ρ_{sat} подставим ее значение по линейной фазовой модели. Учитывая, что в воздухе

$$W_{0sat} = n = 1 - \rho_d / \rho_s, \quad (29)$$

получаем

$$\begin{aligned} \rho_{sat} &= \rho_d(1 + W_{sat}) = \\ &= \rho_d[1 + (\rho_w / \rho_d)n] = \\ &= \rho_d + \rho_w n = \rho_s - n(\rho_s - \rho_w) \end{aligned} \quad (30)$$

и окончательно

$$n' = \frac{\rho_s - \rho_s + n(\rho_s - \rho_w)}{\rho_s - \rho_w} = n. \quad (31)$$

Из (28)–(31) следует, что *архимедовы силы* $F(A)$ *не изменяют пористости водонасыщенного* грунта. Этот вывод подтверждается также равенством эффективного или «подводного» e' и «воздушного» e коэффициентов пористости водонасыщенного грунта:

$$\begin{aligned} e' &= \rho'_s / \rho'_d - 1 = \\ &= (\rho_s - \rho_w) / (\rho_{sat} - \rho_w) - 1 = \\ &= (\rho_s - \rho_{sat}) / (\rho_{sat} - \rho_w) \end{aligned} \quad (32)$$

или, учитывая (30),

$$\begin{aligned} e' &= \frac{n(\rho_s - \rho_w)}{\rho_s - n(\rho_s - \rho_w) - \rho_w} = \\ &= n / (1 - n) = e. \end{aligned} \quad (33)$$

Итак, выполненные исследования приводят к следующим выводам.

1. Теоретические основы современных представлений о взвешивающем действии грунтовых вод на скелет водонасыщенного грунта построены на «архимедовой», т. е. гидростатической, модели «тело в воде» и, в частности, «водонасыщенный грунт в воде». Эта модель имеет существенные расхождения с реальным проявлением взвешивающего действия поровых вод водонасыщенных грунтов, окруженных такими же грунтами и поровыми водами. Поэтому более логичной является модель «вода в теле» и, в частности, «гравитационные и адсорбированные воды в пористых телах».

2. Взвешивающие силы $F(A)$, создаваемые поровыми водами, можно измерить только в том случае, когда образец водонасыщенного грунта находится внутри водоносного горизонта. Таких способов измерения $F(A)$ пока не существует [1, 4, 8–10]. Поэтому современная методология оценки выталкивающих гидростатических сил, действующих на водонасыщенный грунт и его скелет, базируется

не на опытных данных, а на расчетах, вытекающих из гидростатической модели «водонасыщенный грунт в воде».

3. Относительно способности передавать гидростатическое давление и, следовательно, оказывать взвешивающее действие на скелет водонасыщенного грунта поровые воды разделяются на *гравитационные* или свободные, выполняющие эти функции и заключенные в макропорах диаметром более 0,01...0,10 мм, и *негравитационные* или адсорбированные. К последним условно относим кристаллизационные, прочно- и рыхлосвязанные, микрокапиллярные и другие разновидности адсорбированных вод. Поровые пространства, заполненные этими водами, имеют строго определенные размеры, которые по сути являются нижней границей проявления гидростатических сил в водонасыщенных грунтах. Эти размеры зависят прежде всего от дисперсности и минералогического состава грунта, гидрохимии поровых вод, а в целом – от уровня ионно-молекулярного взаимодействия поровой воды со скелетом. Принято, что глубина контактных пространств, заполненных негравитационными водами, равна удвоенной толщине водных пленок, составляющих максимальную молекулярную влагоемкость грунта, и в первом приближении достигает 0,01...0,10 мм.

Поскольку плотность адсорбированных вод ($\rho_a = 1,2...2,1$ г/см³) близка к плотности полутвердых и твердых тел, т. е. существенно превышает плотность обычной гравитационной воды $\rho_g = 1$ г/см³, то взвешивающее действие последней распространяется не только на скелет водонасыщенного грунта, но и на содержащиеся в нем адсорбированные воды, которые с рассматриваемых позиций, очевидно, яв-

ляются составной частью скелета [2–6]. Отсюда следует, что грунты и пористые тела, впитывающие преимущественно адсорбированную влагу и не обладающие водоотдачей ($\mu \rightarrow 0$), в водонасыщенном состоянии не находятся под воздействием взвешивающих гидростатических сил своих поровых вод (этих сил в таких средах просто нет). Данное свойство присуще прежде всего илам, глинам, суглинкам и другим тонкодисперсным грунтам и микропористым средам.

В то же время грубодисперсные грунты и макропористые тела, впитывающие в основном гравитационную влагу и не обладающие адсорбцией ($\beta \rightarrow 0$), в водонасыщенном состоянии при определенных условиях могут находиться под воздействием выталкивающих гидростатических сил своих поровых вод. Интенсивность этого воздействия различна в грунтах разной дисперсности и определяется соотношением содержащихся в них количеств гравитационной и адсорбированной воды.

4. Взвешивающее действие грунтовых вод на скелет водонасыщенного грунта может быть охарактеризовано моделями типа «свайно-пористых», основанных на существовании в водонасыщенных грунтах межфазовых и межчастичных пространств, заполненных адсорбированными водами и обладающих поверхностями, недоступными для точек приложения паскалевских сил и передачи гидростатического давления. Благодаря этим свойствам негравитационных пространств в водонасыщенных грунтах могут формироваться текстуры из сплошных «вертикальных колонн» или столбчатых структур, не подвергающиеся воздействию архимедовых сил из-за отсутствия в них нижних (выталкивающих) поверхностей, исчезающих при срастании этих структур с нижележащими

слоями (дном) и в процессе последующего диагенеза. Таким образом, в основу «свайно-пористых» моделей положено представление о затопленном поле свай, засыпанных песком. Очевидно, в этих моделях соотношения между потопляющими $F(\downarrow)$ и выталкивающими $F(\uparrow)$ силами могут быть самыми разными и должны определяться экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герсеванов, Н. М. Основы динамики грунтовой массы / Н. М. Герсеванов. – М.–Л. : ОНТИ, 1937. – 242 с.
2. Костюкович, П. Н. Основные положения теории нелинейных и комбинированных фазовых моделей дисперсных грунтов / П. Н. Костюкович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. статей XIV науч.-практ. семинара. – Минск, 2006. – Т. 2. – С. 229–235.
3. Костюкович, П. Н. Адсорбированная вода в песчаных и глинистых грунтах Беларуси / П. Н. Костюкович, И. П. Крошнер // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. статей XIV науч.-практ. семинара. – Минск, 2006. – Т. 2. – С. 235–239.
4. Крошнер, И. П. Теория фазовых моделей грунтов Беларуси / И. П. Крошнер, П. Н. Костюкович // Будаўніцтва. Строительство. Construction. – 2002. – № 1–2. – С. 101–122.
5. Крошнер, И. П. Водонасыщенные геос основания в линейной и нелинейных фазовых моделях / И. П. Крошнер, П. Н. Костюкович // Теоретические и практические проблемы геотехники : сб. тр. – СПб., 2005. – С. 143–153.
6. Крошнер, И. П. Влияние влажности на плотность естественных геос оснований / И. П. Крошнер, П. Н. Костюкович // Технология строительства и реконструкции: проблемы и решения : сб. науч. тр. – Минск, 2006. – Т. 1. – С. 135–139.
7. Крошнер, И. П. Графоаналитическое представление линейной фазовой модели дисперсных грунтов / И. П. Крошнер // Теоретические и практические проблемы геотехники : сб. тр. – СПб., 2005. – С. 161–169.

8. **Маслов, Н. Н.** Инженерная геология / Н. Н. Маслов. – М. : Госстройиздат, 1957. – 408 с.
9. **Силкин, А. М.** Основания и фундаменты / А. М. Силкин, Н. Н. Фролов. – М. : Колос,

1981. – 351 с.

10. **Терцаги, К.** Механика грунтов в инженерной практике / К. Терцаги, Р. Пек. – М. : Госстройиздат, 1958. – 608 с.

Белорусский национальный технический университет
Материал поступил 06.03.2007

P. N. Kostyukovitch

Present-day methods of saturated soils suspended condition assessment

Belarusian National Technical University

The article covers present-day notions concerning suspended hydrostatic sources work in saturated soils and gives the conceptual assessment to the corresponding calculation methods of determination of porous water suspended effect. It is also shown that these methods contain principal disparity with the physics of hydrostatic forces in porous media and in particular, with the role of non-gravitational porous water (crystallic, tightly and mellow, micro capillary, etc.), which form interparticle space without the Pascal force application points and thus do not transfer hydrostatic pressure. The influence of Archimedes forces on particle, skeleton and soil density and on volume phase characteristics of saturated soil in general are dealt with. The author gives the aims of further research of this extremely sophisticated but not sufficiently studied problem (especially by experiments) which is very actual for geotechnical design of saturated and submerged geobase.