

УДК 624.141.4

А.Д. Потапов, д-р техн. наук, проф.,
И.А. Потапов,
А.А. Шименкова

ФГБОУ ВПО Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, e-mail: adp1946@mail.ru

РАЗВИТИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

A.D. Potapov, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
I.A. Potapov,
A.A. Shimenkova

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, e-mail: adp1946@mail.ru

DEVELOPMENT OF PHYSIC-CHEMICAL THEORY OF EFFECTIVE STRESS FOR SANDY SOILS

Цель. Теоретическая оценка применимости новых представлений об эффективных напряжениях в грунтах с позиций физико-химической теории академика В.И. Осипова к песчаным грунтам как представителям класса обломочных осадочных пород. Необходимость такой оценки вызвана тем, что распространенные научные представления о формировании свойств грунтов базируются на экспериментально подтвержденных теоретических работах классиков грунтоведения. Эти работы рассматривали эффективные напряжения в грунтах как напряжения, передающиеся на скелет грунта за вычетом порового давления. Основные положения нового подхода наиболее точно описывают формирование эффективных напряжений в глинистых грунтах.

Методика. Теоретическое и экспериментальное изучение песчаных грунтов различного генезиса, обобщение и анализ полученных экспериментальных данных, которые рассматривают структурные особенности песков – гранулометрический состав, морфологические особенности зерен, а также формирование в песках различного рода энергетических контактов: коагуляционного, фазового и переходного.

Результаты. В результате аналитического обобщения показано, что, в зависимости от структурных особенностей, морфологии песчаных зерен (формы и характера поверхности частиц), пески обладают различными значениями предельных плотностей сложения, величиной оптимальной влажности уплотнения, прочностными характеристиками. Оценивается влияние структурных особенностей песков на число истинных контактов между зернами, на формирование различных видов связанной воды в грунтах.

Научная новизна. Теоретический подход и экспериментальное подтверждение полученных новых научных положений заключаются в том, что новая физико-химическая теория формирования эффективных напряжений, описывающая связные грунты, может быть применима и для не менее распространенных в поверхностной зоне земной коры песчаных грунтов.

Практическая значимость. Основное практическое значение полученного теоретического материала заключено в возможностях более точной оценки роли эффективных напряжений в формировании напряженного состояния грунтов разного литолого-петрографического состава. Развитие классической теории формирования эффективных напряжений на базе физико-химических представлений является перспективным направлением грунтоведения и механики грунтов.

Ключевые слова: *эффективные напряжения, грунт, пески, структурные особенности, морфология, энергетические контакты, плотность, прочность, вода, физико-химическая теория*

Постановка проблемы. Сложившиеся к настоящему времени и практически не обновлявшиеся представления о напряжениях в грунтах основаны на работах К. Терцаги, а затем и работах ученых школы академика Б.В. Дерягина, на работах П.А. Ребиндера и др. [1–3]. И здесь следует высказать следующее: описанное в этих работах форми-

рование напряжений в грунтах собственно к грунтам не относится. В них рассматриваются некие отвлеченные теоретические модели некоего абстрактного грунта, которые практически не отражают особенностей реального грунта.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе академика В.И. Осипова [1] излагаются новые подходы к принципам этой важнейшей теории формирования напряжений в грунтах и они,

в отличие от многих других исследований, дают возможность ее применения для различных петрографических разностей грунтов. В классической механике грунтов и в грунтоведении под эффективными напряжениями в грунтах понимаются те напряжения, что передаются на скелет грунта при приложении внешней нагрузки за вычетом порового давления. В работе академика В.И. Осипова [1] на стр. 3 показаны основные трудности теории К. Терцаги. В этой работе рассматриваются новые положения физико-химического подхода к определению эффективных напряжений, но, главным образом, в глинистых грунтах. Значимость изучения глинистых грунтов с этих новых позиций сомнений не вызывает и, более того, оценивается нами исключительно высоко. Согласно утверждению В.И. Осипова „передача напряжений в пористых дисперсных средах идет не по всей межфазной поверхности, а только в местах их наибольшего сближения – контактах. Количество и характер индивидуальных контактов – важнейшая характеристика структур, определяющая величину и характер передачи эффективных напряжений“ [1]. Рассматриваются различные геометрические типы контактов, которые образуются для структур разных грунтов: между сферическими частицами, сферическими и плоскими, между плоскими частицами. Вариантов образования разных контактов множество. Для разных грунтов преобладают те или иные типы контактов в зависимости от наличия в них частиц той или иной формы. На стр. 3 работы В.И. Осипова [1] показано, что К.Терцаги не учитывал в своей теории „распределение напряжений на контактах структурных элементов“ и, в частности: „особенности распределения напряжений на контактах различных геометрических и энергетических типов; существование на контактах тонких пленок связанной воды, обладающей расклинивающим давлением; развитие на контактах различных процессов физико-химической природы, обуславливающих существование внутренних напряжений и др.“. Однако, в этой работе, да и в работах многих других специалистов, на наш взгляд, незаслуженно обойдены вниманием песчаные грунты, которые не менее широко распространены в поверхностной зоне земной коры и обладают не менее важными свойствами, которые должны быть учтены в инженерной практике.

В ряде статей уже были рассмотрены отдельные аспекты физико-химической теории эффективных напряжений применительно к песчаным грунтам, а именно в работах П.А. Ребиндера, И.М. Горьковой и др. [4]. Уже давно установлено, что одной из важнейших структурных характеристик песков является морфология их зерен, т.е. форма частиц и характерная их поверхность. Наиболее характерной формой песчаных частиц, приобретаемой в результате обработки и обладающей минимальной поверхностной энергией, является сфера или эллипсоид вращения и, как правило, это зерна кварца. А вызвано это, прежде всего, тем, что в континентальных условиях накоп-

ления и переотложения образуются, преимущественно, кварцевые пески, реже кварцево-полевошпатовые, хотя встречаются также достаточно часто олигомиктовые и даже полимиктовые разности, что обусловлено конкретной генетической обстановкой их формирования и условиями эпигенеза. Преобладание кварца диктуется, главным образом, его особенностями, а именно – большой устойчивостью к выветриванию, а также твердостью и сопротивляемостью к истиранию как при переносе в водной, так и в воздушной среде. С точки зрения оценки общих морфологических особенностей песков, кроме установления формы частиц, необходимым является и учет характера поверхности песчаных зерен. В свое время нами был предложен показатель морфологии песков, который комплексно описывает как особенности формы, так и характера поверхности песчаных частиц во всем исследуемом объеме песчаного грунта. Методика определения показателя морфологии изложена достаточно подробно и была использована в большом числе исследований песчаных грунтов.

В.И. Осипов пишет, что „для оценки количества контактов берется любая горизонтальная поверхность... внутри пористого тела, ориентированная нормально к направлению приложения внешнего напряжения“ и далее „число контактов в ... моделях определяется размером и формой частиц, способом их укладки и тесно связана с пористостью. Чем меньше размер частиц и плотнее их упаковка, тем больше контактов в единице площади горизонтальной поверхности“ [1]. По В.И. Осипову: „Наиболее простой является *глобулярная модель*, предложенная П.А. Ребиндером, Е.Д. Щукиным и Л.Я. Марголисом для структур, сложенных частицами сферической формы и имеющих пористость более 48%. Позднее эта модель была распространена на структуры с пористостью в интервале от 48 до 26%“ [1]. Рассматриваемая „глобулярная модель может использоваться для песков, песчаников, алевролитов и некоторых тонкодисперсных пород, структурные элементы которых (частицы, микроагрегаты) имеют форму, близкую к сферической“ [1]. Отсюда следует, что, в случае изучения песчаных грунтов, предложенные зависимости могут быть использованы. Однако необходимо отметить, что для реальных природных песков нужно учитывать, что частицы в них могут быть самого разного диаметра, с самой разной формой и количество этих различных частиц может варьировать в значительных пределах. Кроме того, как и было отмечено выше, важную роль играет пористость изучаемого грунта.

Изложение основного материала. Следует остановиться на следующем: в трехмерном случае при рассмотрении упаковки частиц одинакового размера в объеме может быть упаковано не более 12 шаров или эллипсоидов вращения, а это означает, что и число касаний, т.е. число контактов, также равно 12. Данная нижняя оценка была известна ещё И. Ньюто-

ну. В том случае, когда шары или эллипсоиды вращения имеют разные размеры, количество их в единице объема, а тем самым и число контактов, определить достаточно сложно. Более того, в природных песках никогда не встречаются структуры, состоящие из идеальных шаров или эллипсоидов вращения. Количество зерен в упаковке определяет и количество точечных контактов, что, в общем, характерно для песков, в составе которых преобладают минералы, приобретающие в процессе обработки, как правило, округлую форму и только за редким исключением – плоскую, например, при наличии в них слюды-мусковита.

Таким образом, чтобы использовать положения теории В.И. Осипова о формировании эффективных напряжений в грунтах, исходя из физико-химического подхода, для природных песчаных грунтов следует учитывать их структурные особенности: гранулометрический состав и степень однородности грунта, морфологические особенности, минеральный состав. В качестве параметра, который следует изучать в первую очередь, предлагается использовать оценку обработанности песчаных грунтов разной размерности с помощью комплексного показателя морфологии. Нами установлено, что морфологические особенности песков во многом определяют максимальную молекулярную влагоемкость, предельные плотности сложения песков, а также их прочностные и деформационные свойства.

Предложенная теория В.И. Осипова развивается в области определения коагуляционных и фазовых контактов в песчаных грунтах при том, что „...фазовые контакты полностью воспринимают все общие эффективные напряжения и передают их на скелет породы... Влияние физико-химических факторов на распределение эффективных напряжений на них является минимальным и может не учитываться. В связи с этим закон Терцаги успешно применяется для крупнообломочных и большинства песчаных пород...“ [1].

Важную роль в формировании состояния и свойств песчаных грунтов играет вода. Для всех размерностей обломочных грунтов содержание в них различных категорий воды, в большинстве случаев, определяет их состояние и именно оно диктует проявление большинства их свойств. Ряд категорий воды для песчаных грунтов при этом отсутствует, исходя из представлений об адсорбционной природе формирования видов воды в грунтах.

В положениях физико-химической теории большое внимание уделяется роли гидратных оболочек в контактах частиц грунтов и только попутно упоминается о контактных взаимодействиях в песках. В работе В.И. Осипова [1] говорится: „Передача напряжений в пористых дисперсных системах идет не по всей межфазной поверхности, а только в местах их наибольшего сближения – контактах. Количество и характер индивидуальных контактов – важнейшая характеристика структур, определяющая величину и характер передачи эффективных напряжений“. Из

перечисленных далее в этой работе и в общем-то известных геометрических типов контактов для песков характерны: „контакты между сферическими частицами“, по нашим представлениям – контакты между эллипсоидами вращения или сферами и эллипсоидами вращения, а также контакты между сферами (эллипсоидами вращения) и плоскими частицами, что характерно только для слюдистых песков при большом содержании в них слюд. Контакты между плоскими частицами в песках достаточно редки. Даже при наличии в песках угловатых зерен с отдельными плоскими участками, оценивается число контактов не между отдельными частицами, а в целом, т.е. дается общая оценка контактов во всем изучаемом песке, поэтому контакты между этими отдельными плоскостями частиц не являются определяющими. В теории В.И. Осипова говорится о том, что в дисперсных связных системах встречается три энергетических типа контактов: коагуляционный, переходный (точечный), фазовый [1].

В песках также возможны все три типа энергетических контактов. Преобладает, прежде всего, коагуляционный тип (для песков с природной влажностью, песков зоны капиллярной каймы и с природной плотностью), затем переходный точечный тип (для маловлажных уплотненных песков с влажностью зоны аэрации) и, наконец, фазовый тип (для плотных сухих песков и плотностью, стремящейся к предельно плотному сложению и с влажностью, близкой к максимальной гигроскопической). Именно коагуляционный тип энергетического контакта реализуется в песках при взаимодействии частиц с сохранением термодинамически устойчивой прослойки воды на контакте. При наличии в песках пылеватых и тем более глинистых частиц отмеченные энергетические типы контактов проявляются более отчетливо. Примером фазового контакта могут служить высушенные образцы глинистых песков, представляющие собой „псевдопесчаники“, дальнейший процесс литификации приводит уже к образованию истинных песчаников на глинистом цементе. Наличие в песках того или иного вида связанной воды во многом определяет образование коагуляционных контактов, т.к. поверхностные гидратные пленки противодействуют сближению частиц, что соответствует утверждению: „наличие на коагуляционных контактах тонких адсорбционных пленок обусловлено балансом сил притяжения и отталкивания, которые определяют существование расклинивающего давления на контакте“ [1]. Реализация эффективных напряжений в песчаных грунтах, по полученным данным о формировании связанной воды вокруг песчаных частиц сферической формы, осуществляется в условиях коагуляционного контакта.

Истинные контакты реализуются не только за счет соприкосновения „базальной“ составляющей формы частиц, но и соприкосновения за счет деталей поверхности частицы. Поверхность песчаных частиц формируется за счет разного вида обработки частиц трением в водной или воздушной среде, а также

наличием различного рода и состава адсорбированных пленок на частицах твердого вещества. В реальных природных „песчаных“ системах величины площадей коагуляционных контактов могут быть значительно большими, чем расчетные. Величины удельной поверхности песков с частицами с развитой поверхностью и пленками глинистого состава существенно больше, чем у песков с округлыми (окатанными) частицами с гладкой, полированной мягким трением в воде, поверхностью. Это значит, что толщина адсорбированной гидратной или сольватной оболочки также значительно больше. Это говорит о том, что зона перекрытия гидратных или сольватных пленок также увеличивается, а значит и возрастают пределы реализации расклинивающего эффекта. В целом формирование коагуляционного контакта в песчаных грунтах отвечает положениям физико-химической теории эффективных напряжений по В.И. Осипову.

Переходные контакты реализуются как за счет непосредственного соприкосновения частиц, так и коагуляционных контактов. Истинные контакты реализуются на участках, где отсутствуют гидратные или сольватные пленки. Однако, при том, что переходные контакты обладают свойством метастабильности, т.е. способности переходить в коагуляционный контакт, в песках „сухие“ участки, как и в случае глин, при увлажнении и снятии внешнего давления, особенно в мелких, пылеватых и глинистых разностях, химические связи разрываются и весь контакт преобразуется в коагуляционный. Естественно, что проявление разрыва химических связей в песках не настолько ярко выражено как в глинах. Однако, при экспериментально установленном влиянии морфологии на формирование физически связанной воды на частицах, можно утверждать, что для песков характерны и коагуляционный, и переходный тип контактов, как показано в работах П.А. Ребиндера.

Следует вновь остановиться на роли структурных параметров песков в формировании плотности их сложения, исходя из того, что плотность, в сочетании с влажностью грунта, в значительной мере сказывается на напряженном состоянии песчаного грунта и может определять особенности реализации эффективных напряжений. Известно, что предельные плотности сложения песков являются параметрами, которые достаточно широко используются для оценки особенностей состояния песчаных грунтов. Нами было установлено, что предельные плотности – максимальная объемная масса скелета и минимальная объемная масса скелета находятся в определенной зависимости от показателя морфологии. С ростом пористости, при постоянной величине показателя морфологии, число зерен в единице объема естественно уменьшается. Как известно, при упаковке частиц одного диаметра на величину формирующейся пористости влияет лишь морфология частиц. В случае, когда упаковываются частицы разного размера, по своей форме являющиеся обработанными или необработанными, они, в зависимости от своего размера,

имеют возможность перемещаться в отдельные поры между более крупными частицами. Здесь следует отметить факт того, что обработанных частиц в единицу объема укладывается больше, чем необработанных, что объясняет рост предельных плотностей сложения песков.

Выше нами уже было указано, что одним из важных факторов формирования плотности песчаных грунтов в естественных условиях является их влажность, т.е. содержание в грунте различных видов воды. Собственно для песков, как утверждается многими исследователями, следует рассматривать общность „плотность-влажность“ [5]. Необходимо отметить, что оценки предельных плотностей сложения песков выполняются в их воздушно-сухом состоянии, но это означает, что в песках в этом случае всегда присутствует определенное количество связанной воды, которой тем больше, чем менее обработаны частицы песков.

Из результатов исследований следует, что для песков следует рассматривать, в большинстве случаев, когда они не находятся в неводонасыщенном состоянии, наиболее характерные коагуляционные и переходные контакты, которые, как показано в работе В.И. Осипова, определяют формирование эффективных напряжений с позиций физико-химической теории [1].

Исходя из современных представлений о роли видов воды в грунтах, экспериментально полученная в наших исследованиях зависимость между максимальной уплотняемостью песков и их влажностью описывается следующим образом. Повышенная плотность песка при малых значениях влажности обуславливается возможностью достаточно свободной переупаковки его зерен при механическом воздействии (трамбовании) и формированием некоей „псевдогексагональной“ упаковки частиц разного размера и морфологии и, тем самым, достижения высоких значений плотности скелета, а это отвечает методике определения предельно-плотного состояния воздушно-сухого песка. При дальнейшем увеличении влажности уплотняемого песка, вода, которая адсорбирована на поверхности (только на наиболее ее шероховатых участках и, в основном, в углах пор между зернами, в их „псевдоистинных“ контактах), за счет менисковых сил, формирует „цементирующее“ действие и тем самым препятствует свободной переупаковке частиц при механических воздействиях.

Было подтверждено экспериментально, что в процессе переупаковки частиц одинакового размера существенным образом проявляются их морфологические особенности, и были получены данные, которые установили различия в значениях максимальной молекулярной влагоемкости и оптимальной влажности уплотнения по отдельным фракциям песка. Некоторым следствием описанного является факт того, что при влажности максимальной гигроскопичности наблюдается снижение абсолютных значений плотности. Дальнейшее увеличение влажности до значений, близких к максимальной молекулярной влаго-

емкости, приводит к тому, что воды, адсорбируемой на поверхности, становится количественно больше. Эта вода „скрадьвает“ сначала „дефекты“ поверхности, а затем и мелкие „дефекты“ формы, формирует квазисферы „частица-вода“, что снижает влияние морфологических особенностей песков, позволяет осуществляться более свободной переупаковке частиц и достижению более высоких значений плотности. Наличие таких квазисфер обусловлено тем, что именно при влажности, близкой к величине максимальной молекулярной влагоемкости, вода на частицах удерживается очень прочно за счет поверхностных сил. Известно, что прочносвязанная вода может быть удалена из грунта только при очень высоких давлениях и температурах [2]. Максимальная плотность может быть достигнута при оптимальной влажности, которая несколько превышает величину максимальной молекулярной влагоемкости. Эти небольшие количества влаги образуют общие водные оболочки вокруг нескольких частиц и играют роль смазки при их перемещениях под механическим воздействием, одновременно проявляют некие цементирующие свойства, препятствующие разуплотнению грунта. Дальнейшее увлажнение песка приводит к реализации расклинивающего эффекта и, естественно, к уменьшению достигаемой плотности при механическом воздействии. Проведенный анализ особенностей морфологии изученных песков в аспекте их влияния на формирование максимальной плотности при оптимальной влажности уплотнения показал, что с ростом обработанности частиц песка растет величина максимально достигаемой плотности песков.

Изложенное выше имеет непосредственное отношение к положениям физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах. Только при наличии контактов между частицами и возникают напряжения, при отсутствии контактов речи о наличии напряжений в грунте не идет.

Продолжая рассмотрение контактов различного вида и их площадей, следует сказать, что для песчаных частиц различной морфологии площадь фазового („псевдофазового“) контакта может быть определена по зависимостям, изложенным в работе В.И. Осипова [1]. Этот вид контакта наиболее характерен для песков с величиной влажности от воздушно-сухого состояния до влажности максимальной гигроскопичности и от нее до значений предельно плотного состояния песков в воздушно-сухом состоянии. Все это обуславливается тем фактом, что в природных условиях у песков практически не формируется абсолютно сухое состояние. Дальнейшее увеличение влажности и достижение более плотного сложения уже может привести к формированию переходного типа контакта, а далее при оптимальной влажности – к образованию коагуляционного контакта.

Структурная прочность песчаных пород определяется не только прочностью отдельных минеральных зерен и обломков, а также прочностью указанных выше структурных связей, которые формируют-

ся, как известно, в результате сложных и малоизученных физико-химических процессов в песчаных породах [1].

По результатам многочисленных исследований установлено, что силы, по своей природе определяющие прочность связей в грунтах, разделяют на химические, создающие связь между атомами, и физические, реализующиеся, преимущественно, между молекулами. К химическим силам относят те, которые обуславливают ионную и ковалентные связи, а к физическим – силы Ван-дер-Ваальса, подразделяемые на дипольные (ориентационные), индукционные и дисперсионные. Промежуточное положение между химическими и физическими силами занимают водородные связи как показано в работах П.А. Ребиндера и И.М. Горьковой.

Известно, что под прочностью структурных связей грунтов понимают сопротивление структурной сетки разрушению. В этом смысле, сформированная в результате генезиса и процессов эпигенеза структура песчаного грунта представляет собой определенную структурную сетку, элементы которой – частицы песка – связаны структурными взаимодействиями, в том числе и за счет морфологических особенностей. В связи с этим был проведен комплекс исследований прочности песчаных грунтов в различном состоянии по влажности.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что максимальные значения прочности получены при влажностях, близких к нулю (в зоне воздушно-сухого состояния), это практически зона фазового контакта, второй же максимум смещен к зоне влажности, близкой к величине оптимальной влажности. Объяснение заключено в следующем: при влажности от нуля до влажности максимальной гигроскопичности – зерна песка при приложении к ним нагрузок испытывают максимальное трение (особенно в песках с необработанными зернами), и между ними, в большей мере, проявляется такая компонента сцепления как „сцепление-зацепления“, а отсюда и максимум касательных напряжений, угла внутреннего трения и сцепления.

При некотором увеличении влажности, от максимальной гигроскопичности до максимальной молекулярной влагоемкости, постепенный рост влаги на частицах за счет заполнения водой дефектов характера поверхности играет роль смазки, а отсюда – падение абсолютных значений прочности. Это, на наш взгляд, отвечает переходному (точечному) типу энергетического контакта, что дано в результатах исследований П.А. Ребиндера и др. авторов [4]

В зоне влажности, от величины максимальной молекулярной влагоемкости до „оптимальной“ влажности, зерна песка покрыты водными оболочками, которые скрадьвают в значительной мере их морфологические особенности, что приводит к более плотному состоянию песчаного грунта. Кроме того возможно формирование „водного псевдоцемента“. Все это ведет к постепенному росту величин прочностных параметров, значения которых достигают второго максимума при влажности, близкой к „оптимальной“ влаж-

ности, но их абсолютные значения меньше, чем при влажностях в воздушно-сухом состоянии, так как при этом в наибольшей мере, как уже отмечалось, при прочих равных условиях проявляются морфологические особенности зерен песков. Здесь пока мы не можем утверждать, что реализуется в полной мере коагуляционный тип энергетического контакта.

При полной влагоемкости сдвиг происходит при наличии большого количества гравитационной влаги, именно по водным оболочкам, так как частицы песка, за счет наличия этих оболочек, почти не взаимодействуют друг с другом, а отсюда и падение максимальных касательных напряжений, угла внутреннего трения и сцепления.

Выводы. Рассмотрение результатов выполненных экспериментальных исследований на большом числе образцов песчаных грунтов различного генезиса и их теоретический анализ на базе современной физико-химической теории формирования эффективных напряжений, развитие классических представлений об этих напряжениях показывает, что основные положения этой новой теории, в значительной мере, могут быть распространены на песчаные грунты, использование которых, как и глинистых, в инженерной практике весьма значительно.

Список литературы / References

1. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах / Осипов В.И. // ИГЭ РАН. – М.: ИФЗ РАН, 2012. – 74 с.
Osipov, V.I. (2012), "Physico-Chemical Theory of Effective Stress in Soil", *IEG RAS, IPE RAS, Moscow, Russia*.
2. Грунтоведение: 6-е изд.; под ред. Трофимова В.Т. – М.: Наука, 2005. – 1024с.
Trofimov, V.T. (2005), *Gruntovedeniye* [Soil Science], Nauka, Moscow, Russia.
3. Friedmann, E. (2005), *Packing Unit Squares in Squares: a Survey and New Results*, Stetson University, DeLand, available at: <http://www.combinatorics.org/Surveys/ds7.html>
4. Потапов А. Геоэкологическая оценка формирования прочности песчаных грунтов (в аспекте физико-химической теории эффективных напряжений) / А. Потапов, А.Д. Потапов, А.А. Шименкова // Вестник МГСУ – 2013. – № 2. – С.166–181.
Potapov, I.A., Shimenkova, A.A. and Potapov, A.D. (2013), "Formation of different types of power contacts in the sandy soils in the aspect of physical-chemical theory of effective stress", *Vestnik MGSU*, no.11, pp. 210–218.
5. Потапов А.Д. Роль плотности-влажности песчаных грунтов в формировании эффективных напряжений с позиций физико-химической теории / А.Д. Потапов, И.А. Потапов, А.А. Шименкова // Вестник МГСУ – 2012. – № 12. – С. 104–110.
Potapov, A.D., Potapov, I.A. and Shimenkova, A.A. (2012), "The role of density, moisture content of sandy soils in the formation of effective stress in terms of physico-chemical theory". *Vestnik MGSU*, no. 12, pp. 104–110.

Мета. Теоретична оцінка застосовності нових уявлень щодо ефективних напружень у грунтах з позицій фізико-хімічної теорії академіка В.І. Осипова до піщаних ґрунтів як представників класу уламкових осадових порід. Необхідність такої оцінки викликана тим, що поширені наукові уявлення щодо формування властивостей ґрунтів базуються на експериментально підтверджених теоретичних роботах класиків ґрунтознавства. Ці роботи розглядали ефективні напруги у грунтах як напруги, що передаються на скелет ґрунту за вирахуванням порового тиску. Основні положення нового підходу найбільш точно описують формування ефективних напружень у глинистих грунтах.

Методика. Теоретичне та експериментальне вивчення піщаних ґрунтів різного генезису, узагальнення та аналіз отриманих експериментальних даних, що розглядають структурні особливості пісків – гранулометричний склад, морфологічні особливості зерен, а також формування в пісках різного роду енергетичних контактів: коагуляційного, фазового та перехідного.

Результати. У результаті аналітичного узагальнення показано, що, у залежності від структурних особливостей, морфології піщаних зерен (форми та характеру поверхні частинок), піски володіють різними значеннями граничної щільності складання, величиною оптимальної вологості ущільнення, характеристиками міцності. Оцінюється вплив структурних особливостей пісків на число істинних контактів між зернами, на формування різних видів зв'язаної води у грунтах.

Наукова новизна. Теоретичний підхід та експериментальне підтвердження отриманих нових наукових положень полягають у тому, що нова фізико-хімічна теорія формування ефективних напружень, яка описує зв'язні ґрунти, може бути застосовна й для не менш поширених у поверхневій зоні земної кори піщаних ґрунтів.

Практична значимість. Основне практичне значення отриманого теоретичного матеріалу полягає в можливостях більш точної оцінки ролі ефективних напружень у формуванні напруженого стану ґрунтів різного літолого-петрографічного складу. Розвиток класичної теорії формування ефективних напружень на базі фізико-хімічних уявлень є перспективним напрямом ґрунтознавства та механіки ґрунтів.

Ключові слова: ефективні напруги, ґрунт, піски, структурні особливості, морфологія, енергетичні контакти, щільність, міцність, вода, фізико-хімічна теорія

Purpose. The purpose of research materials, which are described in the article, is a theoretical evaluation of the applicability of new ideas about effective stresses in the soil from the standpoint of physical and chemical theory of academician V.I. Osipov to sandy soils, as representatives of the class of clastic sedimentary rocks. Such an evaluation is of importance; as the common scientific understanding of the formation of soil properties is based on the experimentally confirmed theoretical

works of the classics of soil science. These works considered effective stress in soil as a stress transmitted to soil skeleton excluding pore pressure. The main provisions of the new approach describe formation of effective stress in the clay soils most accurately.

Methodology. The main methods of research were theoretical and experimental study of sandy soils of different origin; generalization analysis of the experimental data which consider the structural characteristics of sand: grain size distribution; morphological characteristics of grains; formation of coagulation, phase, and transition power contacts.

Findings. The analytical synthesis showed that the difference in structural characteristics and sand grains morphology (particles' shape and surface nature) causes different values of ultimate composition density, optimum moisture content for firming, and strength characteristics. The sand structural features effect on the number of real contacts between its grains and the formation of different types of bound water in soil has been considered.

Originality. The theoretical approach and its experimental proof allowed the new physical-chemical theory of effective stress formation in cohesive soils which can be applied for sandy soils widespread in the earth crust.

Practical value. We now have the possibility to assess the influence of effective stresses on formation of the stress condition of the soils of different lithological and petrographic composition more accurately. The development of the classical theory of effective stresses formation on the basis of physico-chemical concepts is a promising area of soil science and soil mechanics.

Keywords: *effective stresses, soil, sand, structural features, morphology, power contacts, density, strength, water, physical and chemical theory*

Рекомендовано до публікації докт. геол.-мінер. наук В.П. Хоменком. Дата надходження рукопису 20.04.13.

**Chen Zijian, Deng Jingen, Yu Baohua,
Yan Chuanliang**

State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting,
China University of Petroleum, Beijing, China
e-mail: 13488780158@163.com

PORE PRESSURE PREDICTION IN THE DONGFANG 1-1 GAS FIELD, YINGGEHAI BASIN

**Чен Зіян, Денг Йінген, Юй Баохуа,
Чуаньлянь Янь**

Державна головна лабораторія нафтових ресурсів і розвідки, Китайський університет нафти, м.Пекін, КНР,
e-mail: 13488780158@163.com

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОРОВОГО ТИСКУ В ГАЗОВОМУ РОДОВИЩІ DONGFANG 1-1 ГАЗОНОСНОГО БАСЕЙНУ YINGGEHAI

Dongfang 1-1 gas field is a high temperature and high pressure area. An accurate pore pressure prediction is very important for safe drilling in this area. The authors have analyzed and classified the overpressure mechanisms on the base of loading and unloading, which are the relationships of vertical effective stress and acoustic velocity. Then, the logging responses for different overpressure mechanisms have been discussed. Based on the above, the new method of pore pressure prediction by means of the DT-density crossplot and DT-density-depth crossplot has been proposed. The method has been applied to analyze the overpressure causes and predict a high temperature and high pressure well in DF1-1 gas filed, Yinggehai Basin. The results show that the overpressure in DF1-1 gas filed is caused by three factors: disequilibrium compaction, aquathermal expansion and hydrocarbon generation. Their contribution to the overpressure in different formations is different. By using the DT-density crossplot and the DT-density-depth crossplot the contribution can be distinguished and feasible prediction model can be chosen. The authors have proved that the Eaton method is only suitable for disequilibrium compaction; but the Bowers method is effective for the overpressure caused by disequilibrium compaction or fluid volume expansion. This method improves the pore pressure prediction accuracy in DF 1-1 gas filed effectively. It is of importance to the drilling engineering.

Keywords: *DF 1-1 gas filed, high temperature, high pressure, overpressure mechanism, loading, unloading, pore pressure prediction*

Introduction. The Dongfang 1-1 (DF1-1) gas filed is the largest gas filed in China. It is located in the

Yinggehai Sea Basin, about 100 km to the west of Yinggehai town, Hainan province (Fig. 1). The water depth is about 64–70 m. The gas reserve of the field is estimated to excess a hundred billion cubic over the gas-