

Энергетическая оценка процессов уплотнения-разуплотнения песчаных грунтов

В статье рассмотрен энергетический подход к оценке процессов компрессионного уплотнения-разуплотнения песков. Разработана методика энергетической оценки процессов компрессии-декомпрессии и рекомпрессии песчаных грунтов на основе оценки величин работы, совершаемой в ходе этих процессов. Анализ полученных экспериментальных данных позволяет выявлять закономерности уплотнения-разуплотнения в песчаных грунтах, а также давать сравнительную характеристику деформационных свойств исследуемых грунтов с использованием интегральных параметров, отражающих весь нелинейный процесс деформирования во всем интервале действующих напряжений.

Королев Владимир Александрович

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., г. Москва, Россия

Матвеев Владимир Владимирович

Магистрант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, бакалавр геологии, Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ

При ведении строительной и хозяйственной деятельности грунты могут подвергаться попеременному уплотнению и разуплотнению. Поэтому изучению закономерностей циклического уплотнения-разуплотнения глинистых грунтов посвящено довольно много работ [1-4, 6, 9-11], однако исследование этих процессов в песках почти не проводилось [8]. Между тем механизм компрессионного уплотнения-разуплотнения в песках совсем иной,

чем в глинах, т.к. эти грунты, в отличие от глин, не способны набухать и в них вклад расклинивающего давления воды при декомпрессии отсутствует.

Кроме того, изучение процессов компрессионного уплотнения-разуплотнения глинистых грунтов как правило, проводилось стандартными методами [7]. Лишь в некоторых работах была предпринята попытка оценить эти процессы с энергетических позиций [5,9]. Так, например, Ф.Г.Габибовым [2,3] была экспериментально получена равновесная замкнутая петля гистерезиса компрессии - декомпрессии различных глин, которая была описана методами равновесной термодинамики. Для песков подобные работы отсутствуют.

Исходя из этого **целью** настоящей статьи является выявление особенностей и закономерностей механического поведения песчаных грунтов при их компрессии-декомпрессии на основе термодинамики. Большинство математических моделей механического поведения грунтов адекватно рассматривают в основном первичное нагружение, понимаемое как упруго-пластический процесс, и разгрузку, рассматриваемую как упругий линейный процесс. При этом, процесс компрессии-декомпрессии в общем случае нелинейный и для его характеристики возможно использовать энергетический подход [1, 5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования проводились с использованием песчаных грунтов нарушенного сложения. В качестве объектов исследования был выбран аллювиальный песок средней крупности. Для оценки влияния фактора начальной плотности на закономерности уплотнения и разуплотнения песков было выбрано два образца песчаного грунта одного возраста и генезиса с одинаковыми показателями свойств, кроме начальной плотности и коэффициента пористости (e), которые задавались для разного сложения песка: для первого образца $e = 0,60$; для второго образца $e = 0,65$; влажность образцов была одинаковой и составляла $w = 14 \%$.

Изучение деформационных свойств песчаных грунтов проводилось в ходе компрессионных испытаний с нагрузкой, разгрузкой и повторной нагрузкой по ГОСТ 12248.4-2020, в приборах ООО «НПП ГеоТек» (Пенза) при максимальной ступени нагрузок равной 1,5 МПа на образцах заданной исходной плотности и влажности [7].

В результате проведенных лабораторных опытов были получены стандартные компрессионные кривые изучаемых грунтов в координатах «относительная деформация – уплотняющая нагрузка» (рис.1).

Как видно из этих графиков, образец с большей плотностью (кривые *a*) менее сжимаем, а остаточная деформация и дополнительная деформация при повторном нагружении меньше. Это объясняется тем, что при более высокой плотности (кривые *b*) в песке больше число и суммарная площадь контактов между частицами в единице объема грунта. Также из рис.1 следует, что в песках разгрузка проявляется не за счет набухания как в глинистых грунтах, а за счет упругих деформаций, роль которых тем больше, чем плотнее сложение песка. Для более детального изучения этих закономерностей нами была выполнена специальная обработка компрессионных кривых с вычислением различных энергетических показателей процессов компрессии-рекомпрессии.

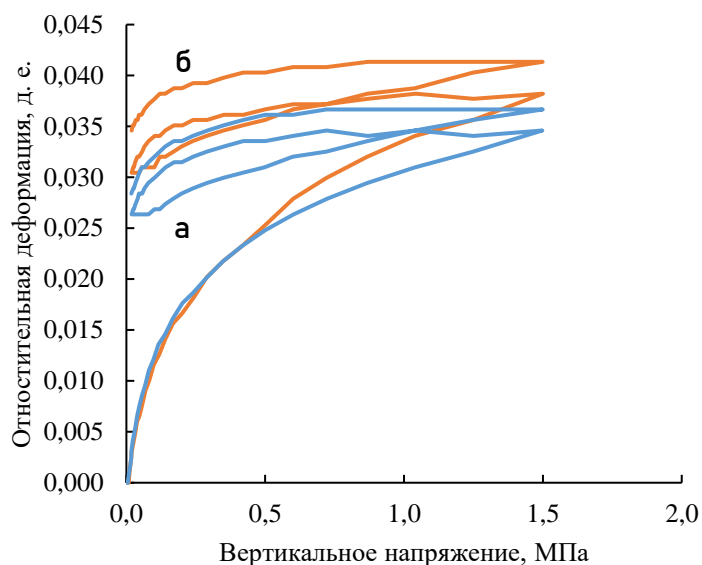


Рис. 1. Компрессионные кривые песка средней крупности с разным исходными коэффициентом пористости (e): a — $e = 0,60$, $w = 14\%$ (синие кривые); b — $e = 0,65$; $w = 14\%$ (оранжевые кривые)

Обработка результатов испытаний. Полученные компрессионные кривые обрабатывались с целью вычисления по ним энергетических (термодинамических) параметров процессов уплотнения-разуплотнения. При этом особый интерес представляет использование величины работы деформации (A) для описания механического поведения песчаных грунтов, поскольку позволяет одной величиной (одним числом) охарактеризовать деформируемость на любом интервале напряжений, и что очень важно — даже в случае нелинейной зависимости деформаций от напряжений. Это позволяет каждый цикл (нагрузки или разгрузки) оценивать одним числом и сравнивать циклы между собой.

Работа упругопластического деформирования (МДж) грунта на этапе компрессии (A_1) рассчитывалась по формуле [1]:

$$A_1 = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon,$$

где ε_1 — относительная деформация в конце этапа компрессии; $\sigma(\varepsilon)$ — вертикальное напряжение.

Графически эта работа соответствует площади над компрессионной кривой — закрашенная область на рис. 2.

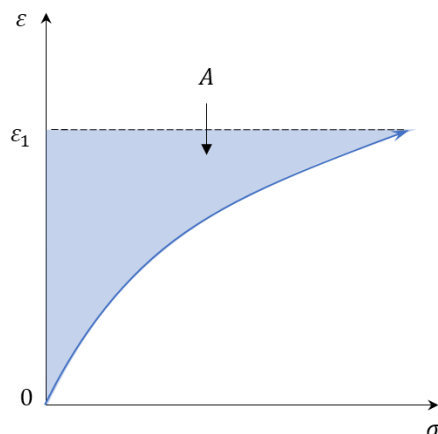


Рис.2. К оценке работы упругопластического деформирования на этапе компрессии

Работа упругопластического деформирования (МДж) на *этапе рекомпрессии* (A_i) рассчитывается по формуле (рис. 3):

$$A_i = \int_{\varepsilon_{i-1} - \Delta\varepsilon_{i-1}^e}^{\varepsilon_i} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon,$$

где $\varepsilon_{i-1} - \Delta\varepsilon_{i-1}^e$ — относительная деформация в начале этапа ($i - 1$) рекомпрессии; ε_i — относительная деформация в конце этапа ($i - 1$) рекомпрессии; $\sigma(\varepsilon)$ — вертикальное напряжение.

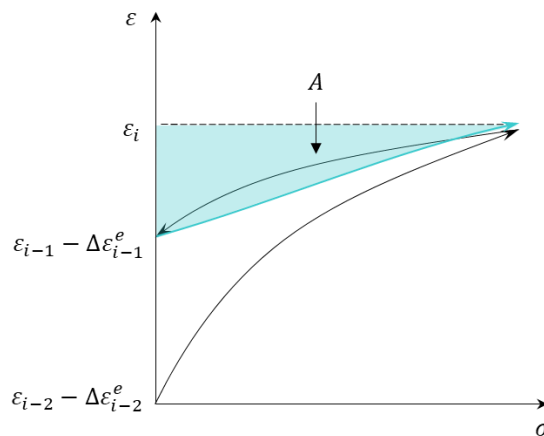


Рис. 3. К оценке работы упругопластического деформирования на этапе рекомпрессии

Работа деформирования (МДж) на этапе декомпрессии (A^e) рассчитывается по формуле (закрашенная область на рис. 4):

$$A_i^e = \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_i - \Delta\varepsilon_i^e} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon,$$

где ε_i — относительная деформация в начале этапа i -й декомпрессии, равная относительной деформации в конце предыдущего этапа; $\varepsilon_i - \Delta\varepsilon_i^e$ — относительная деформация в конце этапа i -й декомпрессии; $\sigma(\varepsilon)$ — вертикальное напряжение.

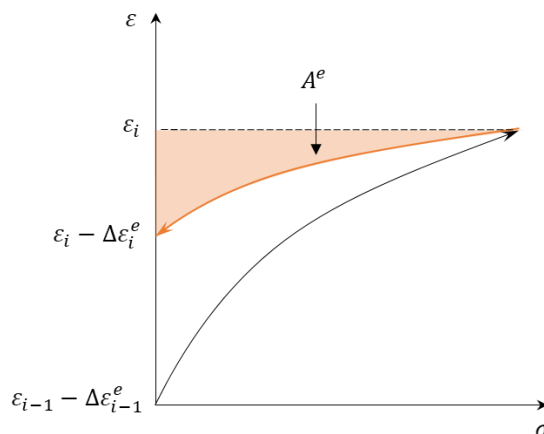


Рис.4. К оценке работы деформирования при декомпрессии

Численное интегрирование, т. е. вычисление по экспериментальным компрессионным кривым площадей (величин работ), проводилось методом трапеций с узлами в экспериментальных точках (рис. 5):

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})$$

где A — работа деформирования (МДж) на выбранном этапе; n — количество ступеней; ε_i — относительная деформация в конце i -й ступени; ε_{i-1} — относительная деформация в конце предыдущей ступени $i - 1$; σ_i — вертикальное напряжение i -й ступени (МПа); σ_{i-1} — вертикальное напряжение предыдущей ступени $i - 1$ (МПа); при этом $\varepsilon_0 = 0, \sigma_0 = 0$.

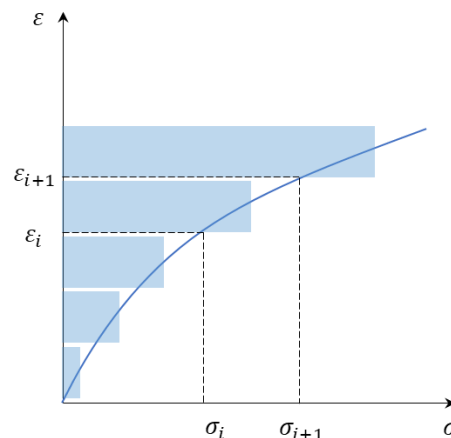


Рис. 51. К оценке численного интегрирования методом трапеций

Рассмотренные выше величины работ при компрессии-декомпрессии и рекомпрессии являлись абсолютными. Для их сравнительного анализа необходимо перейти к удельным величинам работ ($A_{уд}$), которые рассчитывались нами делением абсолютных значений работ (A) на исходный объем (V) грунта в одомере (МДж/м³):

$$A_{уд} = A/V.$$

Работа диссипации при упруго-пластическом деформировании грунта за цикл нагрузка-разгрузка A^p (МДж) может оценена опытным путем при определении общей и обратимой деформации как функции от напряжений, исходя из уравнения (закрашенная область на рис. 6):

$$A_i^p = \int_{\varepsilon_{i-1} - \Delta\varepsilon_{i-1}^e}^{\varepsilon_i} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon - \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_i - \Delta\varepsilon_i^e} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

или

$$A_i^p = A_i - A_i^e.$$

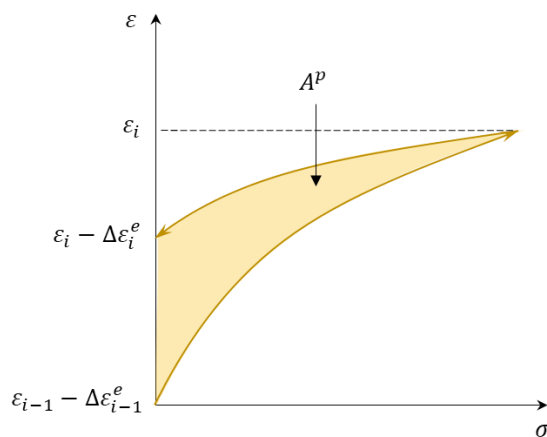


Рис. 6. К оценке работы диссипации грунта при компрессии (\rightarrow) и декомпрессии (\leftarrow)

Работа диссипации A^p представляет собой работу, затраченную на необратимую деформацию за счет ее рассеяния и превращения в тепло, т. е. потерянную работу.

Доля работы диссипации (DSER, в процентах) характеризует безвозвратно рассеиваемую работу и определяется как отношение работы диссипации к удельной работе на этапе нагрузки:

$$DSER = \frac{A_i^p}{A_i}.$$

Площадь петли гистерезиса в цикле декомпрессии-рекомпрессии (H_i , МДж/м³) вычисляется по формуле (рис. 7):

$$H_i = A_{i+1} - A_i^e.$$

Следует обратить внимание, петля гистерезиса в данном случае может быть незамкнутой.

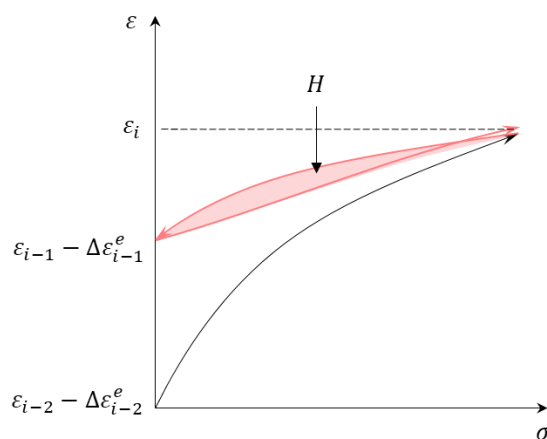


Рис. 7. К оценке площади петли гистерезиса в цикле декомпрессии-рекомпрессии

Величины DSER и H_i также рассчитываются как удельные (на испытываемый объем образца).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения удельной работы в ходе проведенных опытов по компрессии-рекомпрессии песков представлены на рис. 8. В таблице 1 приведены величины удельной работы на каждом из этапов испытаний песков в разных исходных состояниях.

Из представленных данных следует, что работа деформации песков на этапе нагрузки A_1 , разгрузки A_1^e и повторной нагрузки A_2 тем больше, чем меньше плотность песчаного грунта (15,9 против 12,9 кДж/м³, 2,2 против 1,8 кДж/м³, 6,6 против 6,5 кДж/м³, соответственно).

При меньшей плотности песка работа диссипации A^p выше на 20 % (31,7 против 24,6 кДж/м³), доля работы диссипации $DSEr$ сохранилась прежней (86 %), а площадь петли гистерезиса также практически не изменилась (4,4 и 4,6 кДж/м³). Таким образом, удельная работа деформации на каждом этапе деформирования, а также рассеиваемая работа за цикл нагрузки-разгрузки (работа диссипации) снижается по мере увеличения исходной плотности сложения песка и может быть оценена количественно для сравнительного анализа.

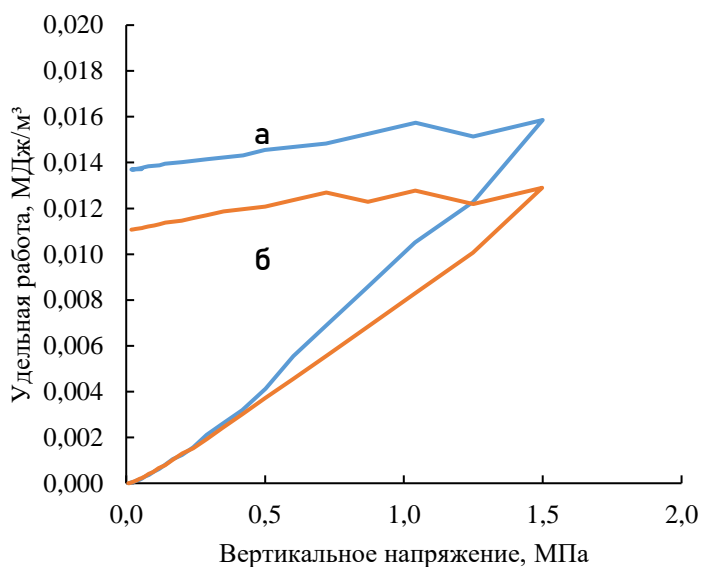


Рис. 8. Зависимость удельной работы компрессии-декомпрессии и рекомпрессии песка средней крупности с исходной влажностью ($w = 14\%$) и разными коэффициентами пористости (e): a — $e = 0,60$; $б$ — $e = 0,65$;

Таблица 1

Влияние начальной плотности-влажности на уплотнение-разуплотнение песка средней крупности

№	Этап	Уд. работа на этапе, кДж/м ³	Работа дисс. A^p , кДж/м ³ (по циклу нагр.-разгр.)	Доля работы дисс. $DSEr$, %	Площ. петли гистер., кДж/м ³ (по циклу разгр.-нагр)
Коэффициент пористости $e = 0,65$, $w = 14\%$					
1	компрессия	15,9	13,7	86	4,4
2	декомпрессия	-2,2			
3	рекомпрессия	6,6			

Коэффициент пористости $e = 0,60$, $w = 14 \%$					
1	компрессия	12,9	11,1	86	4,6
2	декомпрессия	-1,8			
3	рекомпрессия	6,5			

Исходя из представленных данных можно заключить, что для песчаных грунтов начальная плотность оказывает существенное влияние на удельную работу упругого и упругопластического деформирования, а также работу диссипации, причем чем меньше плотность, тем выше значения величин перечисленных удельных работ. Кроме того, видно, что с каждым последующим циклом уплотнения-разуплотнения все перечисленные виды удельных работ закономерно уменьшаются независимо от начальной плотности песка.

В дальнейшем предстоит изучить на основе энергетической оценки влияние других факторов на процессы компрессии-декомпрессии песков, таких как: 1) гранулометрический состав песков; 2) исходная влажность песков; 3) число циклов нагрузки-разгрузки и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика энергетической оценки процессов компрессии-декомпрессии и рекомпрессии песчаных грунтов на основе величин работы в этих процессах. Анализ полученных экспериментальных данных позволяет выявлять закономерности уплотнения-разуплотнения в песчаных грунтах, а также давать количественную сравнительную характеристику деформационных свойств исследуемых грунтов с использованием интегральных параметров, отражающих весь нелинейный процесс деформирования во всем интервале действующих напряжений. Установлено, что начальная плотность оказывает существенное влияние на удельную работу упругого и упругопластического деформирования, а также работу диссипации, причем чем меньше исходная плотность песков, тем выше значения величин перечисленных удельных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов // Уч. пособ. – М.: Высш. Школа, 1978, - 447 с.;
2. Габиров Ф.Г. Термодинамический метод изучения процессов сжатия-набухания водонасыщенных глинистых грунтов. Тезисы докладов VII Республиканской научной конференции аспирантов ВУЗов Азербайджана, т.П, Баку, 1984, с.104.
3. Габиров Ф.Г. Разработка теории и методов оптимизации свойств неустойчивых глинистых грунтов при решении задач прикладной геоэкологии // Автореф. дисс.... докт. т.н. – Волгоград: ВГАСУ, 2006. – 42 с.
4. Зиангиров Р. С. Объемная деформируемость глинистых грунтов — М.: Наука — 1979. —164 с.
5. Королёв В. А. Термодинамика грунтов / Учебник. — М.: ООО Сам полиграфист, 2016. — 258 с.
6. Кульчицкий Л. И., Усыряев О. Г. Физико-химический основы формирования свойств глинистых пород. — М.: Недра — 1981. — 178 с.
7. Лабораторные работы по грунтоведению: уч. пособие / Под ред. В. Т. Трофимова и В. А. Королёва, изд. 3-е испр. и доп / В. А. Королёв, В. Т. Трофимов, Е. Н. Самарин и др. — КДУ Москва, 2017. — 654 с.

8. Песчаные грунты России: в 2-х томах. Том 1 / Под ред. В.Т. Трофимова / В. Т. Трофимов, В. А. Королёв, С. Д. Балыкова и др. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2021. — 394 с.

9. Термодинамические аспекты механики мерзлых грунтов // Сб. под ред. С.С.Вялова. — М.: Наука, 1988, - 103 с.;

10. Физико-химическая механика природных дисперсных систем. Под ред. Е.Д. Щукина, Н.В. Перцова, В.И. Осипова, Р.И. Злочевской / Ю. П. Акимов, Е. А. Амелина, С. Д. Воронкевич и др. — Изд-во МГУ Москва, 1985. — 266 с.

11. Suddeepong A., Chai J., Shen S., Carter J. Deformation behaviour of clay under repeated one-dimensional unloading–reloading. (2015) Canadian Geotechnical Journal. 52(8): 1035-1044.