

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ УПЛОТНЕНИЯ-РАЗУПЛОТНЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Принята к публикации 17.12.2024. Опубликовано 20.12.2024

### КОРОЛЁВ В.А.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д. г.-м. н., профессор, г. Москва, Россия  
va-korolev@bk.ru

### МАТВЕЕВ В.В.

Магистрант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия  
gaogradlab@yandex.ru

### АННОТАЦИЯ

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.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

работа диссипации; работа деформирования; компрессионное уплотнение; песок; площадь петли гистерезиса.

### ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Королёв В.А., Матвеев В.В. Энергетическая оценка процессов уплотнения-разуплотнения песчаных грунтов // ГеоИнфо. 2024. Т. 6. № 11. С. 18–23.  
DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-11-18-23.

# ENERGY ASSESSMENT OF COMPACTION-DECOMPACTION PROCESSES OF SANDY SOILS

Accepted for publication on December 17, 2024. Published on December 20, 2024.

## KOROLEV V.A.

DSc, professor at the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
va-korolev@bk.ru

## MATVEYEV V.V.

Magistrand at the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
gaogradlab@yandex.ru

## ABSTRACT

The article considers the energy approach to assessing the processes of compressive compaction-decompression of sands. A technique for energy assessment of compression-decompression and recompression processes in sandy soils has been developed on the basis of the assessment of values of the work performed during these processes. The analysis of the obtained experimental data makes it possible to identify compaction-decompression regularities for sandy soils, as well as to provide a comparative description of the deformation properties of the studied soils with the use of integral parameters reflecting the entire nonlinear deformation process over the entire range of working stresses.

## KEYWORDS:

dissipation work; deformation work; compressive compaction; sand; hysteresis loop area.

## FOR CITATION:

Korolev V.A., Matveev V.V. Ehnergeticheskaya otsenka protsessov uplotneniya-razuplotneniya peschanykh gruntov [Energy assessment of compaction-decompression processes of sandy soils] // GeolInfo. 2024. T. 6. № 11. S. 18–23. DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-11-18-23 (in Rus.).

## 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 [1–8], однако исследования этих процессов в песках почти не проводились [9]. Между тем механизм компрессионного уплотнения-разуплотнения в песках совсем иной, чем в глинах, так как 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 [10]. Лишь в некоторых работах была предпринята попытка оценить эти процессы с энергетических позиций [6, 11]. Например, Ф.Г. Габитовым [2, 3] была экспериментально получена равновесная замкнутая петля гистерезиса компрессии-декомпрессии различных глин, которая была описана методами равновесной термо-

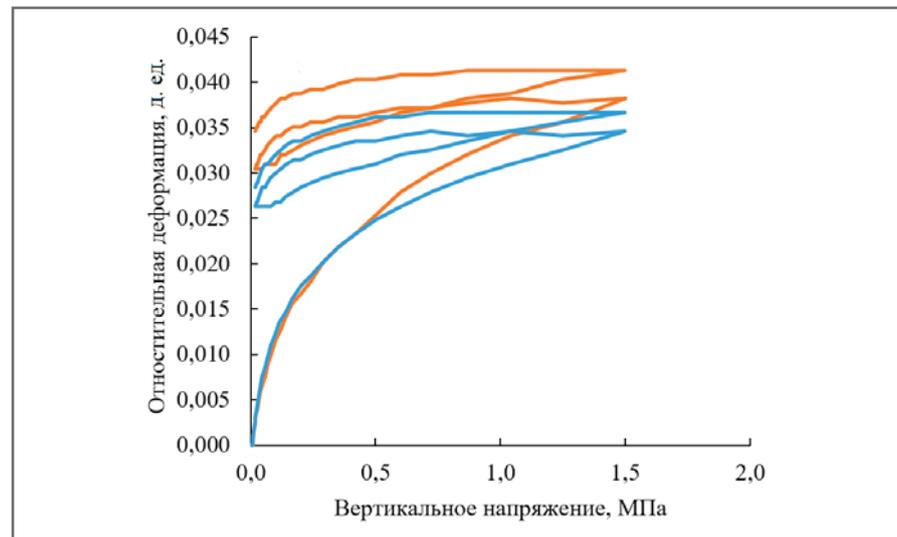
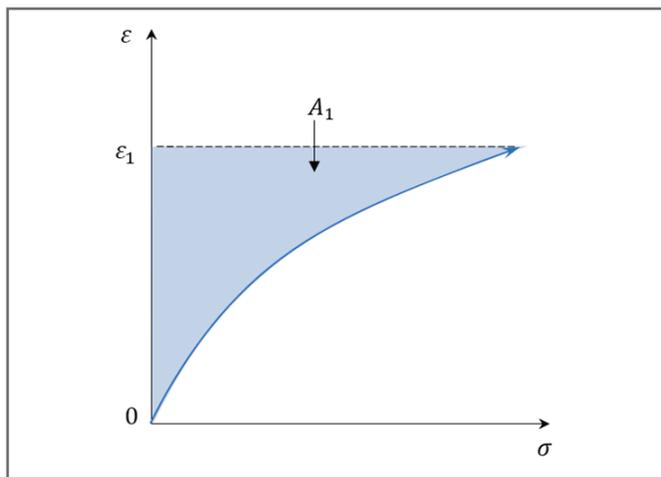


Рис. 1. Компрессионные кривые для образцов песка средней крупности с одинаковой исходной влажностью  $w=14\%$  и с разными исходными коэффициентами пористости ( $e$ ): синие кривые –  $e=0,60$ ; оранжевые кривые –  $e=0,65$

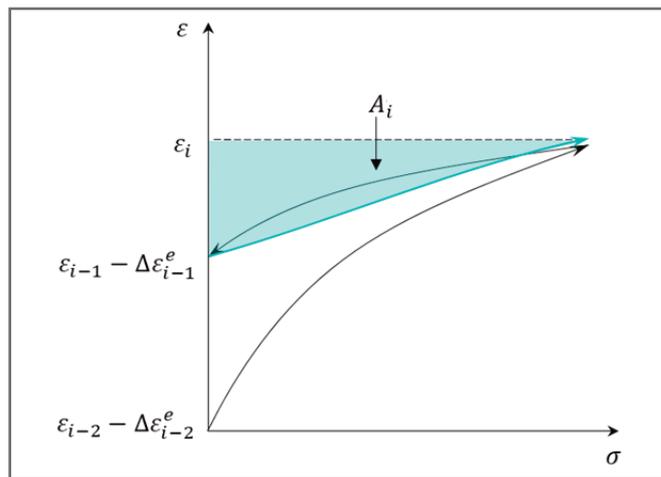
динамики. Для песков подобные работы отсутствуют.

Поэтому 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 рассматривает в основном первичное нагружение, понимаемое как упругопластический процесс, и разгрузку, рассматриваемую как упругий линейный процесс. При этом процесс компрессии-декомпрессии в общем случае нелинейный и для его ха-



**Рис. 2.** К оценке работы упругопластического деформирования на этапе компрессии. Работа упругопластического деформирования грунта на этапе компрессии ( $A_1$ ) соответствует площади над компрессионной кривой (закрашенной области)



**Рис. 3.** К оценке работы упругопластического деформирования на этапе рекомпрессии. Работа упругопластического деформирования на этапе рекомпрессии ( $A_i$ ) соответствует площади закрашенной области

рактически возможно использовать энергетический подход [1, 11].

**Материалы и методы** ▶

Экспериментальные исследования проводились с использованием песчаных грунтов нарушенного сложения. В качестве объекта исследований 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 ( $w$ ) была одинаковой и составляла 14%.

Изучение деформационных свойств песчаных грунтов проводилось в ходе компрессионных испытаний с нагрузкой, разгрузкой и повторной нагрузкой по ГОСТ 12248.4-2020 в приборах от ООО «НПП ГеоТек» (г. Пенза) при максимальной ступени нагрузок, равной 1,5 МПа. Испытывались образцы с заданными исходными плотностью и влажностью [10].

**Данные испытаний** ▶

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

Как видно из этих графиков, образец с большей плотностью (синие кривые) менее сжимаем, а остаточная деформация и дополнительная деформация при

повторном нагружении меньше. Это объясняется тем, что при более высокой плотности (оранжевые кривые) в песке больше число и суммарная площадь контактов между частицами в единице объема грунта. Из рисунка 1 также 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.

**Результаты расчетов по полученным кривым** ▶

Была выполнена специальная обработка полученных компрессионных кривых в целях 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, что позволяет одной величиной (одним числом) охарактеризовать деформируемость в любом интервале напряжений, даже, что очень важно, в случае нелинейной зависимости деформаций от напряжений. Это дает возможность оценивать каждый цикл (нагрузки или разгрузки) одним числом и сравнивать циклы между собой.

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

$$A_1 = \int_0^{\epsilon_1} \sigma(\epsilon) d\epsilon, \quad (1)$$

где  $\epsilon_1$  – относительная деформация в конце этапа компрессии;  $\sigma(\epsilon)$  – вертикальное напряжение.

Графически эта работа соответствует площади над компрессионной кривой, которая показана закрашенной областью на рисунке 2.

Работа упругопластического деформирования на этапе рекомпрессии ( $A_i$ , МДж) рассчитывается по формуле (соответствует закрашенной области на рисунке 3):

$$A_i = \int_{\epsilon_{i-1} - \Delta\epsilon_{i-1}^e}^{\epsilon_i} \sigma(\epsilon) d\epsilon, \quad (2)$$

где  $(\epsilon_{i-1} - \Delta\epsilon_{i-1}^e)$  – относительная деформация в начале этапа ( $i-1$ ) рекомпрессии;  $\epsilon_i$  – относительная деформация в конце этапа ( $i-1$ ) рекомпрессии;  $\sigma(\epsilon)$  – вертикальное напряжение.

Работа деформирования на этапе декомпрессии ( $A_i^e$ , МДж) рассчитывается по формуле (соответствует закрашенной области на рисунке 4):

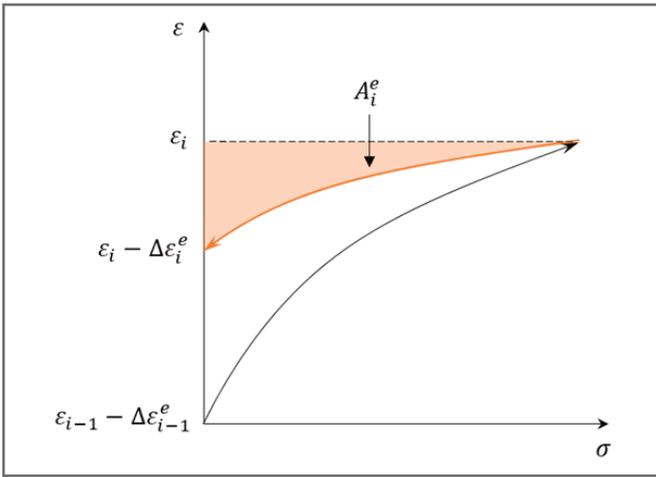
$$A_i^e = \int_{\epsilon_i}^{\epsilon_i - \Delta\epsilon_i^e} \sigma(\epsilon) d\epsilon, \quad (3)$$

где  $\epsilon_i$  – относительная деформация в начале этапа  $-i$  декомпрессии, равная относительной деформации в конце предыдущего этапа;  $(\epsilon_i - \Delta\epsilon_i^e)$  – относительная деформация в конце этапа  $-i$  декомпрессии;  $\sigma(\epsilon)$  – вертикальное напряжение.

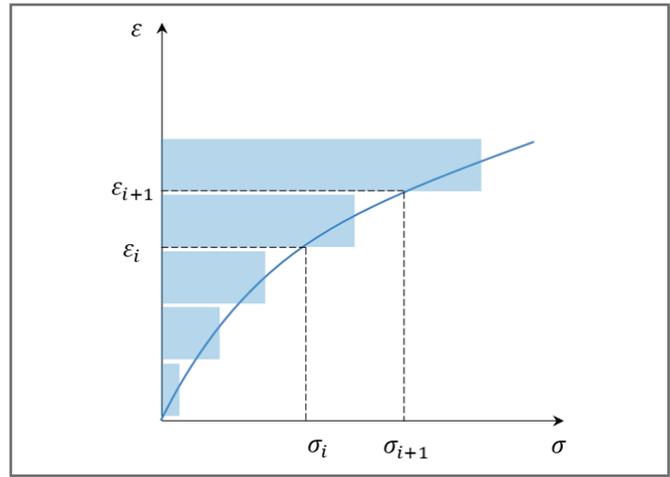
Численное интегрирование, то есть вычисление по экспериментальным компрессионным кривым площадей (величин работ), проводилось методом трапеций с узлами в экспериментальных точках (рис. 5):

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} (\epsilon_i - \epsilon_{i-1}), \quad (4)$$

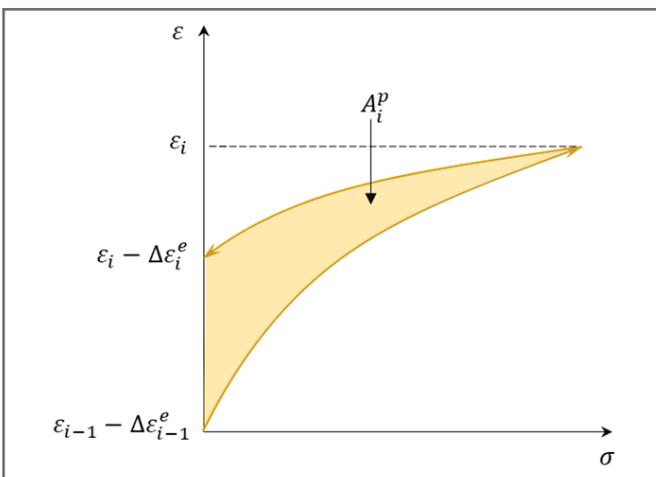
где  $A$  – работа деформирования (МДж) на выбранном этапе;  $n$  – количество ступеней;  $\epsilon_i$  – относительная деформация в конце  $-i$  ступени;  $\epsilon_{i-1}$  – относительная



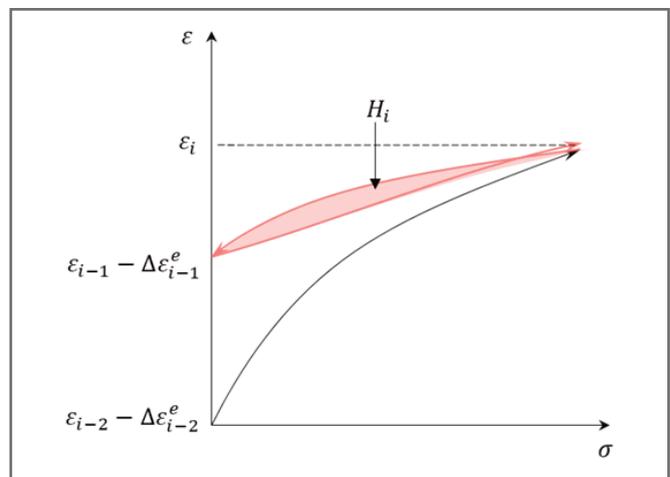
**Рис. 4.** К оценке работы деформирования при декомпрессии. Работа деформирования на этапе декомпрессии ( $A_i^e$ ) соответствует площади закрашенной области



**Рис. 5.** К вычислению по экспериментальным компрессионным кривым площадей (величин работ) путем численного интегрирования методом трапеций



**Рис. 6.** К оценке работы диссипации при упругопластическом деформировании грунта за цикл нагрузки-разгрузки ( $A_i^p$ , соответствует закрашенной области) (→ – компрессия, ← – декомпрессия)



**Рис. 7.** К оценке площади петли гистерезиса (соответствующей закрашенной области) в цикле декомпрессии-рекомпрессии

деформация в конце предыдущей ступени ( $i-1$ );  $\sigma_i$  – вертикальное напряжение  $i$ -й ступени (МПа);  $\sigma_{i-1}$  – вертикальное напряжение предыдущей ступени ( $i-1$ ) (МПа); при этом  $\varepsilon_0=0$ ,  $\sigma_0=0$ .

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 делением абсолютных значений работ ( $A$ ) на исходный объем ( $V$ ) грунта в одомере (МДж/м<sup>3</sup>):

$$A_{уд.} = A/V. \quad (5)$$

Работа диссипации при упругопластическом деформировании грунта за цикл нагрузки-разгрузки ( $A_i^p$ , МДж) может быть оценена опытным путем при определении общей и обратимой деформации как функции от напряжений

исходя из уравнения (соответствует закрашенной области на рисунке 6):

$$A_i^p = \int_{\varepsilon_{i-1} - \Delta\varepsilon_{i-1}^e}^{\varepsilon_i} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon - \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_i - \Delta\varepsilon_i^e} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (6)$$

или

$$A_i^p = A_i - A_i^e. \quad (7)$$

Работа диссипации  $A_i^p$  представляет собой работу, затраченную на необратимую деформацию за счет ее рассеяния и превращения в тепло, то есть потерянную работу.

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

$$DSER = \frac{A_i^p}{A_i}. \quad (8)$$

Площадь петли гистерезиса в цикле декомпрессии-рекомпрессии ( $H_i$ , МДж/м<sup>3</sup>) вычисляется по формуле (рис. 7):

$$H_i = A_{i+1} - A_i^e. \quad (9)$$

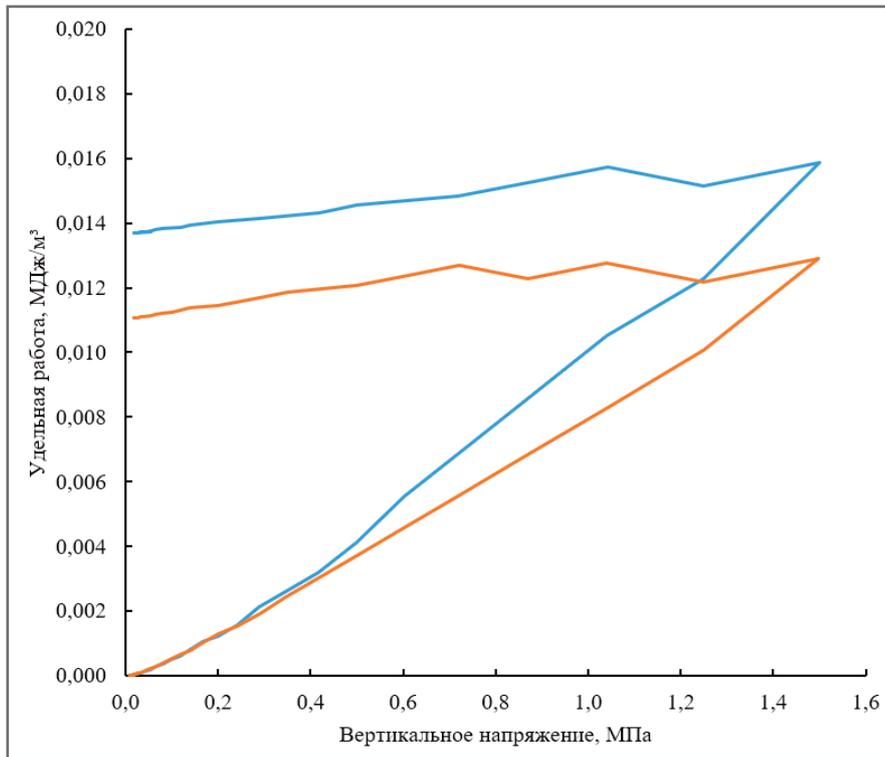
Следует обратить внимание, что петля гистерезиса в данном случае может быть незамкнутой.

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

### Результаты и их обсуждение ►

Результаты определения удельной работы на основе проведенных опытов по компрессии-рекомпрессии песков представлены на рисунке 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



**Рис. 8.** Зависимость удельной работы компрессии-декомпрессии и рекомпрессии образцов песка средней крупности с одинаковой исходной влажностью  $w=14\%$  и с разными исходными коэффициентами пористости ( $e$ ): синяя кривая –  $e=0,60$ ; оранжевая кривая –  $e=0,65$

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 против 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.

Исходя из представленных данных можно заключить, что для песчаных грунтов начальная плотность оказывает существенное влияние на удельную работу упругого и упругопластического

деформирования, а также на 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 на процессы компрессии-декомпрессии песков со стороны других факторов, 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 на работу диссипации, причем чем меньше исходная плотность песков, тем выше значения перечисленных удельных работ. **И**

**Таблица. Влияние начальной плотности при одинаковой влажности  $w=14\%$  на уплотнение-разуплотнение песка средней крупности**

№	Этап	Уд. работа на этапе, кДж/м³	Работа диссипации $A^p$ , кДж/м³ (по циклу нагр.-разгр.)	Доля работы диссипации DSER, %	Площ. петли гистерезиса, кДж/м³ (по циклу разгр.-нагр)
<b>При исходном коэффициенте пористости <math>e = 0,65</math></b>					
1	Компрессия	15,9	13,7	86	4,4
2	Декомпрессия	-2,2			
3	Рекомпрессия	6,6			
<b>При исходном коэффициенте пористости <math>e = 0,60</math></b>					
1	Компрессия	12,9	11,1	86	4,6
2	Декомпрессия	-1,8			
3	Рекомпрессия	6,5			

**Список литературы** ▶

1. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: уч. пособ. М.: Высш. школа, 1978. 447 с.
2. Габибов Ф.Г. Термодинамический метод изучения процессов сжатия-набухания водонасыщенных глинистых грунтов // Тезисы докладов VII Республиканской научной конференции аспирантов вузов Азербайджана. Баку, 1984. Т. 2. С. 104.
3. Габибов Ф.Г. Разработка теории и методов оптимизации свойств неустойчивых глинистых грунтов при решении задач прикладной геоэкологии: автореф. дисс. .... док. тех. наук. Волгоград: ВГАСУ, 2006. 42 с.
4. Зиангиров Р.С. Объемная деформируемость глинистых грунтов. М.: Наука, 1979. 164 с.
5. Кульчицкий Л.И., Усъяров О.Г. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. М.: Недра, 1981. 178 с.
6. Термодинамические аспекты механики мерзлых грунтов / под ред. С.С. Вялова. М.: Наука, 1988. 103 с.
7. Акимов Ю.П., Амелина Е.А., Воронкевич С.Д. и др. Физико-химическая механика природных дисперсных систем / под ред. Е.Д. Шукина, Н.В. Перцова, В.И. Осипова, Р.И. Злочевской. М.: Изд-во МГУ, 1985. 266 с.
8. Suddeerpong A., Chai J., Shen S., Carter J. Deformation behaviour of clay under repeated one-dimensional unloading-reloading // Canadian Geotechnical Journal. 2015. Vol. 52. № 8. С. 1035–1044.
9. Трофимов В.Т., Королёв В.А., Балыкова С.Д. и др. Песчаные грунты России (в 2-х томах) / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2021. Т. 1. 394 с.
10. Королёв В.А., Трофимов В.Т., Самарин Е.Н. и др. Лабораторные работы по грунтоведению: уч. пособие (изд. 3-е испр. и доп.) / под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королёва. М.: КДУ, 2017. 654 с.
11. Королёв В.А. Термодинамика грунтов: учебник. М.: ООО «Сам полиграфист», 2016. 258 с.



## Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал  
**Геоинфо**

- **Новости**
- **Статьи**
- **Обсуждения**

<https://t.me/geoinfonews>