



# ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ ПОРОВОЙ ЖИДКОСТИ (УГЛЕВОДОРОДОВ) НА МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ГЛИНЫ

## INFLUENCE OF THE PORE FLUID (HYDROCARBONS) VISCOSITY ON THE DEFORMATION MODULUS OF CLAY

### СЕРЕДИН В.В.

Заведующий кафедрой инженерной геологии и охраны недр геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ), д.г.-м.н., профессор, г. Пермь, nedra@nedra.perm.ru, seredin@nedra.perm.ru

### КРАСИЛЬНИКОВ П.А.

Доцент кафедры инженерной геологии и охраны недр геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ), к.г.н., г. Пермь, nedra@nedra.perm.ru, kafedra.ingeo@gmail.com

### ЧИЖОВА В.А.

Инженер кафедры инженерной геологии и охраны недр геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ), г. Пермь, nedra@nedra.perm.ru

### SEREDIN V.V.

Head of the Department of Engineering Geology and Mineral Resources Protection of the Geology Faculty of Perm State National Research University, DSc (doctor of science in Geology and Mineralogy), professor, Perm, nedra@nedra.perm.ru, seredin@nedra.perm.ru

### KRASILNIKOV P.A.

Associate professor of the Department of Engineering Geology and Mineral Resources Protection of the Geology Faculty of Perm State National Research University, PhD (candidate of science in Geography), Perm, nedra@nedra.perm.ru, kafedra.ingeo@gmail.com

### CHIZHOVA V.A.

Engineer of the Department of Engineering Geology and Mineral Resources Protection of the Geology Faculty of Perm State National Research University, Perm, nedra@nedra.perm.ru

#### Ключевые слова:

модуль деформации грунта; нефтепродукты; вязкость поровой жидкости.

#### Key words:

deformation modulus of soil; petroleum products; pore fluid viscosity.

#### Аннотация

При добыче, транспортировке и переработке нефти и нефтепродуктов иногда возникают аварийные ситуации, в результате чего на земную поверхность попадают углеводороды, которые приводят к изменениям свойств грунтов, выступающих в роли оснований инженерных сооружений. Это приводит как к увеличению, так и к снижению прочностных свойств песков и глинистых грунтов. Однако многие вопросы остаются открытыми, в т.ч. и влияние типа поровой жидкости на модуль деформации грунта. Поэтому целью данной работы является изучение влияния вязкости углеводородов на модуль деформации глин. Экспериментально установлено, что с увеличением содержания в глине поровой жидкости значение модуля деформации уменьшается. Рассчитаны математические модели прогноза изменений модуля общей деформации в зависимости от содержания в глине воды, дизельного топлива, моторного и трансмиссионного масел. Выявлены взаимосвязи между вязкостью углеводородов (УВ) и модулем деформации: с увеличением вязкости УВ модуль общей деформации глин увеличивается. Сопоставление изменений угла внутреннего трения и модуля деформации при углеводородном загрязнении показало, что в песках и суглинках угол внутреннего трения, а в глинах модуль общей деформации подчиняются одной и той же закономерности: с увеличением вязкости поровой жидкости значения угла внутреннего трения и модуля деформации возрастают.

#### Abstract

Accidents sometimes occur during production, transportation and processing of oil and petroleum products. As a result hydrocarbons spill onto the ground surface. It leads to changes of foundation soil properties resulting in both increase and decrease of strength properties of sands and clay soils. However, many questions remain open, including influence of the pore fluid type on the deformation modulus of soil. Therefore, the aim of this paper is to study influence of the hydrocarbons viscosity on the deformation modulus of clays. It was experimentally found the deformation modulus decreases with increase of the pore fluid content in clay. Mathematical models for forecasting the total deformation modulus depending on the content of water, diesel fuel, engine oil, transmission oil in clay are calculated. Relationships between the hydrocarbons viscosity and the deformation modulus are revealed: the total deformation modulus of clay increases with growth of the hydrocarbons viscosity. Comparison of changes of the internal friction angle and deformation modulus at hydrocarbon pollution shows that the internal friction angle of sands and loams and the total deformation modulus of clays are subjected to the same regularity: the internal friction angle and the deformation modulus increase with growth of the pore fluid viscosity.



### Введение

При добыче, транспортировке и переработке нефти и нефтепродуктов возникают аварийные ситуации, в результате которых на земную поверхность попадают углеводороды, приводящие к изменению свойств грунтов как оснований инженерных сооружений. В работе [8] показано, что при загрязнении нефтепродуктами наблюдается изменение агрегатного состава глинистых грунтов. Это приводит как к увеличению, так и к снижению прочностных свойств песков и глинистых грунтов [4, 7]. Изменениям деформационных свойств грунтов при загрязнении их нефтепродуктами посвящены работы [1, 3]. Однако многие вопросы остаются открытыми, в том числе и влияние типа поровой жидкости на модуль деформации. Целью данной работы является изучение влияния вязкости углеводородов на модуль деформации глин.

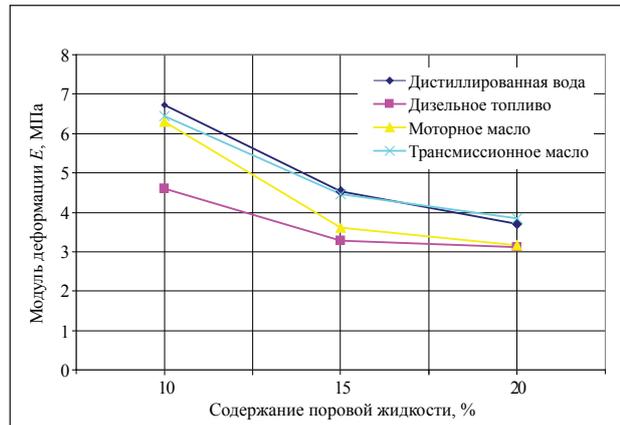
### Объект и методика исследований

Объектом исследований являлась каолинитовая глина. В качестве поровой жидкости (загрязнителя) выступали:

- дистиллированная вода (с вязкостью  $\eta = 0,658 \text{ мм}^2/\text{с}$  при температуре  $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- дизельное топливо ( $\eta = 3 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- моторное масло «Лукойл Мото 2Т» ( $\eta = 65 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- трансмиссионное масло ТЭП-15 ( $\eta = 164 \text{ мм}^2/\text{с}$  при  $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Методика исследований включала в себя подготовку образцов и изучение модуля деформации методом компрессионного сжатия.

Подготовка образцов к лабораторным испытаниям осуществлялась следующим образом. Первоначально в глинистый порошок добавлялась дистиллированная вода из расчета создания начальной влажности 20%. Смесь выдерживалась в эксикаторе 1 сут. В данную



**Рис. 1. Зависимости модуля деформации каолинитовой глины от содержания в ней различных загрязнителей в качестве поровой жидкости**

смесь добавляли 10, 15 и 20% загрязнителя и выдерживали в эксикаторе 1 сут. В качестве загрязнителей использовали: дистиллированную воду; дизельное топливо; моторное масло; трансмиссионное масло. Полученную смесь в рабочем кольце компрессионного прибора предварительно уплотняли под нагрузкой  $\sigma = 0,1 \text{ МПа}$  до полной стабилизации деформаций (0,01 мм/сут).

Испытания проводились в компрессионном настольном приборе КПр-1 без возможности бокового расширения грунта. Высота исследуемых образцов составляла 25 мм, диаметр — 87,4 мм.

После уплотнения (подготовки образца) на грунт подавались нагрузки 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 МПа. Каждая ступень выдерживалась до условной стабилизации деформации образца — 0,1 мм за 12 ч. По окончании опыта строились графики компрессионных кривых. Модуль деформации рассчитывался при давлениях 0,15 и 0,25 МПа.

Расчет компрессионного модуля общей деформации  $E_k$  производился по формуле:

Таблица

Результаты определения компрессионного модуля общей деформации* (МПа) каолинитовой глины								
Содержание загрязнителя, %	Дистиллированная вода		Дизельное топливо		Моторное масло		Трансмиссионное масло	
	$E_{эк}$	$E_{ср}$	$E_{эк}$	$E_{ср}$	$E_{эк}$	$E_{ср}$	$E_{эк}$	$E_{ср}$
10	6,08	6,72	5,43	4,79	6,60	6,31	6,44	6,45
	5,63		4,14		6,24		6,24	
	8,44		4,80		6,08		6,70	
15	4,38	4,53	3,30	3,30	3,77	3,59	4,23	4,47
	4,70		3,28		3,43		4,34	
	4,50		3,32		3,56		4,85	
20	3,56	3,70	3,21	3,11	3,26	3,16	3,68	3,84
	3,83		3,10		3,06		3,89	
	3,70		3,02		3,15		3,96	

$E_{эк}, E_{ср}$  — экспериментальное и среднее значение компрессионного модуля общей деформации соответственно.

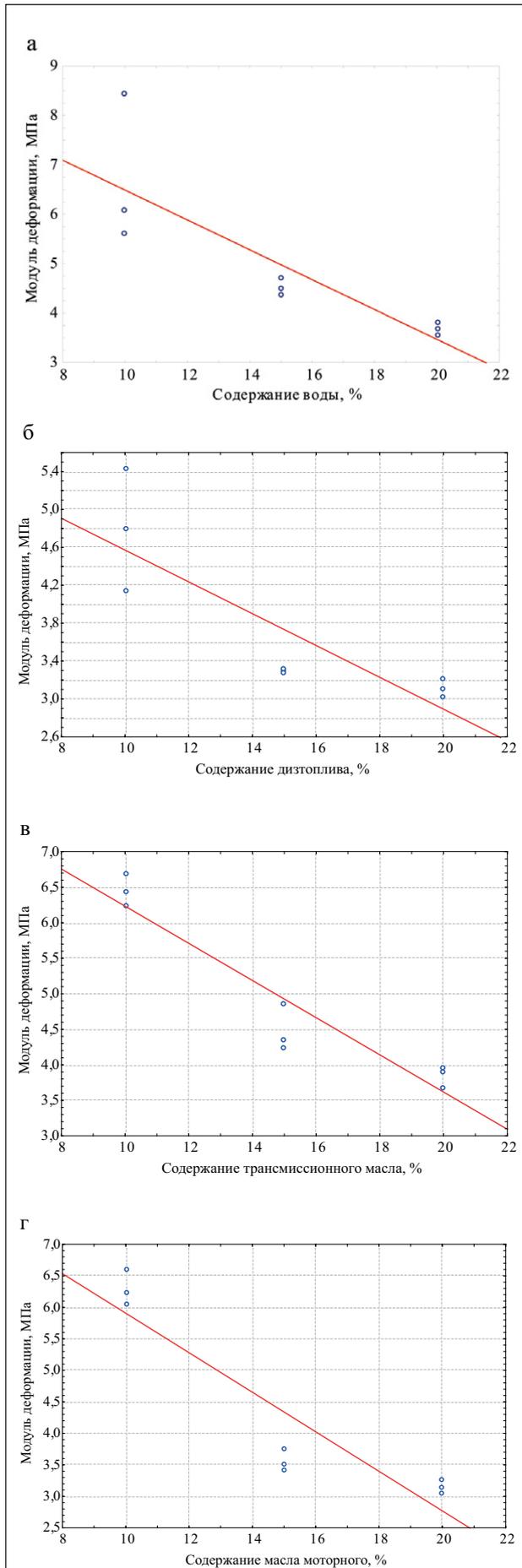


Рис. 2. Зависимости модуля общей деформации от типа и содержания в каолиновой глине поровой жидкости: а — воды; б — дизельного топлива; в — трансмиссионного масла; г — моторного масла

$$E_k = (\Delta p / \Delta \epsilon) \cdot \beta, \quad (1)$$

где  $\Delta p$  — принятый интервал давления на образец грунта,  $\Delta p = p_2 - p_1 = 0,25 - 0,15 = 0,1$  МПа;  $\Delta \epsilon$  — изменение относительной вертикальной деформации образца грунта, соответствующее  $\Delta p$ ;  $\beta$  — коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения грунта в компрессионном приборе, для суглинка  $\beta = 0,6$ .

Определение деформационных характеристик грунта одной влажности выполнялось на трех образцах грунта. Всего было исследовано 40 образцов.

Обработка полученной информации производилась с использованием вероятностно-статистических методов [6].

### Результаты исследований

В таблице приведены результаты экспериментальных исследований по определению компрессионного модуля деформации.

### Обсуждение полученных результатов

На рисунке 1 представлены зависимости модуля общей деформации каолиновой глины от содержания в ней загрязнителей. Из него видно, что с увеличением содержания поровой жидкости модуль деформации уменьшается. При этом наибольшие его значения характерны для глин, поровый раствор которых представлен дистиллированной водой или трансмиссионным маслом, а наименьшие — когда поровым раствором является дизельное топливо.

Авторами был проведен корреляционный анализ экспериментальных данных. Его результаты показали, что между модулем деформации и содержанием в глине поровой жидкости существует статистическая связь, о чем свидетельствуют статистически значимые

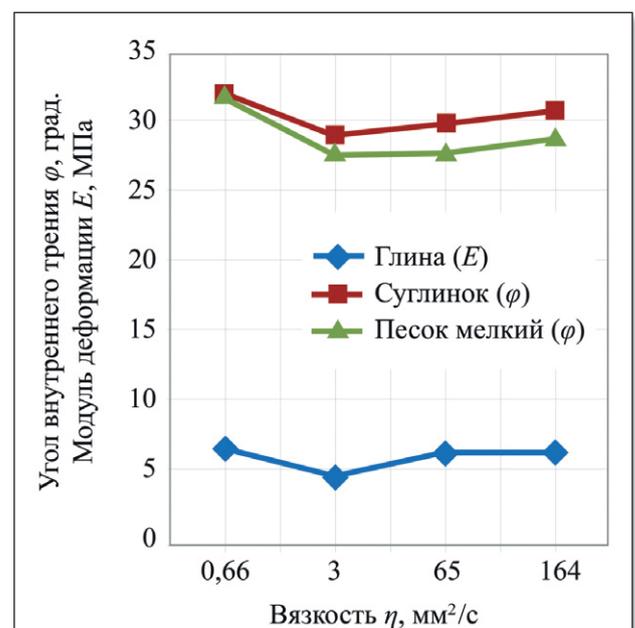


Рис. 3. Изменения модуля общей деформации глины (E) и угла внутреннего трения суглинка и песка (φ) (по [4, 7]) в зависимости от вязкости поровой жидкости (η)



величины коэффициентов парной корреляции  $r$ , превышающие по модулю критическое значение коэффициента корреляции  $r_k$ , равное 0,81. Это позволяет перейти ко второму шагу — разработке прогнозных моделей. Для этого был использован регрессионный анализ и построены диаграммы рассеяния. Полученные результаты представлены на рисунке 2. Из него видно, что с увеличением содержания в грунте порового раствора модуль общей деформации уменьшается.

Были получены (рассчитаны) математические модели для прогноза изменений модуля общей деформации  $E$  в зависимости от содержания  $C$  (с соответствующим нижним индексом) в каолининовой глине поровой жидкости, представленной:

*дистиллированной водой (д.в.):*

$$E = 9,51 - 0,302 \cdot C_{д.в.} \\ (r = -0,84; r_k = 0,81; |r| > |r_k|); \quad (2)$$

*дизельным топливом (д.т.):*

$$E = 6,2522 - 0,168 \cdot C_{д.т.} \\ (r = -0,84; r_k = 0,81; |r| > |r_k|); \quad (3)$$

*моторным маслом (м.м.):*

$$E = 9,0439 - 0,3137 \cdot C_{м.м.} \\ (r = -0,91; r_k = 0,81; |r| > |r_k|); \quad (4)$$

*трансмиссионным маслом (т.м.):*

$$E = 8,8506 - 0,2617 \cdot C_{т.м.} \\ (r = -0,94; r_k = 0,81; |r| > |r_k|). \quad (5)$$

Изменения модуля общей деформации глины в зависимости от вязкости поровой жидкости показаны на рисунке 3 (синяя кривая). Из него видно, что наи-

большее значение  $E$  характерно для глины, поровым раствором в которой является дистиллированная вода ( $\eta = 0,658$  мм<sup>2</sup>/с), наименьшее — когда поровым раствором является дизельное топливо ( $\eta = 3$  мм<sup>2</sup>/с). Далее при увеличении вязкости порового раствора до  $\eta = 65$  мм<sup>2</sup>/с (моторное масло) и до  $\eta = 164$  мм<sup>2</sup>/с (трансмиссионное масло) наблюдается увеличение модуля общей деформации.

На рисунке 3 также показаны изменения углов внутреннего трения песка и суглинка по данным работ [4, 7]. Из сопоставления графиков видно, что зависимости угла внутреннего трения песка или суглинка и модуля деформации глины от вязкости загрязнителя подчиняются одним и тем же закономерностям, хотя механизмы формирования прочности и деформируемости у этих грунтов различны.

### **Заключение**

Экспериментально установлено, что с увеличением содержания в каолининовой глине поровой жидкости значение модуля деформации уменьшается. Рассчитаны математические модели для прогноза изменений модуля общей деформации в зависимости от содержания в глине воды, дизельного топлива, моторного масла, трансмиссионного масла.

Выявлены взаимосвязи между вязкостью углеводородов, выступающих в качестве поровой жидкости, и модулем деформации: с увеличением вязкости загрязнителя модуль общей деформации каолининовой глины увеличивается.

Сопоставление показало, что зависимости угла внутреннего трения песка или суглинка и модуля деформации глины от вязкости загрязнителя подчиняются одним и тем же закономерностям: с увеличением вязкости поровой жидкости значения угла внутреннего трения песка или суглинка и модуля деформации глины возрастают. 

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Архангельский И.В. Пути повышения качества исследований деформационных свойств грунтов // Инженерная геология. 2008. № 2. С. 58–64.
2. Болдырев Г.Г., Арефьев Д.В., Гордеев А.В. Определение деформационных характеристик грунтов различными лабораторными методами // Инженерные изыскания. 2010. № 8. С. 16–23.
3. Бракоренко Н.Н., Емельянова Т.Я. Влияние нефтепродуктов на петрографический состав и физико-механические свойства песчано-глинистых грунтов (на примере г. Томска) // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 342. С. 197–200.
4. Середин В.В. Исследование влияния вязкости поровой жидкости (углеводородов) на прочностные свойства песков // Инженерная геология. 2014. № 4. С. 45–48.
5. Середин В.В. Исследование температуры пород в зоне трещины разрушения // Фундаментальные исследования. 2014. № 9–12. С. 2713–2717.
6. Середин В.В. Математические методы в гидрогеологии и инженерной геологии: курс лекций. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2011. 122 с.
7. Середин В.В., Ядзинская М.Р. Закономерности изменений прочностных свойств глинистых грунтов, загрязненных нефтепродуктами // Инженерная геология. 2014. № 2. С. 26–32.
8. Середин В.В., Ядзинская М.Р. Исследования механизма агрегации частиц в глинистых грунтах при загрязнении их углеводородами // Фундаментальные исследования. 2014. № 8–6. С. 1408–1412.
9. Текучев Ю.Б., Конашинская Е.П. О полевых испытаниях грунтов штампами малой площади // Инженерные изыскания. 2010. № 8. С. 24–25.