

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 532.135

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДООБРАЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, С ПОМОЩЬЮ КОНУСНОЙ ПЕНЕТРАЦИИ. ЧАСТЬ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

*В.В. Белов**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., 2024

**Аннотация.** Отмечено, что для определения реологических характеристик структурированных дисперсных систем большими преимуществами обладает пенетрометрия, основанная на погружении в исследуемую среду конического индентора. Указано, что главной проблемой в использовании конических пластометров выступает достоверность полученных результатов. Продемонстрировано, что большинство уплотненных трехфазных систем являются твердообразными и что периоды восстановления разрушенных связей у них сокращаются. Для таких систем разработан и рассмотрен метод определения реологических характеристик с помощью пенетрационного реометра на основе модельных представлений о картине деформирования среды в зоне внедрения конуса с постоянной скоростью. Сделан вывод, что применение описанной методики позволяет измерять как предельное напряжение сдвига, так и вязкость структурированных дисперсных систем.

**Ключевые слова:** реологические характеристики, пенетрометрия, структурированные дисперсные системы, предельное напряжение, сдвиг, вязкость, метод конусной пенетрации, деформирование среды, конус.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-72-82**

С реологической точки зрения структурированные дисперсные системы, к которым относится большинство сырьевых смесей строительных материалов, подразделяют на жидкообразные и твердообразные упруговязкопластичные. Полное реологическое описание дисперсных систем включает несколько реологических характеристик, соответствующих различным степеням разрушения структуры: предельное напряжение сдвига, предел текучести, вязкость, модуль упругости и т. д. К настоящему времени разработано множество приборов и способов для определения реологических характеристик структурированных дисперсных систем. Наиболее часто применяют метод сдвига ребристой пластинки Вейлера – Ребиндера [1], в дальнейшем усовершенствованный [2]. Кроме того, используется метод вращающихся коаксиальных цилиндров, предложенный Ф.Н. Шведовым, впоследствии детально разработанный

Н.П. Воларовичем [3]. Данный метод также развивается и в настоящее время, в том числе с учетом температурной зависимости [4]. Приборы создают в системе практически однородное поле напряжений, однако они неприменимы для исследования твердообразных систем, частицы которых связаны между собой значительно большими (по сравнению с жидкообразными системами) силами аутогезии различной природы [5–7]. Среди этих сил следует особо выделить силы сцепления, обусловленные поверхностным натяжением жидкости и капиллярным давлением [8, 9]. Для твердообразных систем практически единственным способом определения их реологических свойств является метод конусной пенетрометрии.

Сведения об изучении механических свойств дисперсных систем путем измерения глубины погружения конусного индентора под действием известной силы появились в литературе более 50 лет назад и относились к испытаниям глинистых грунтов ненарушенной структуры, проведенным Шведской геотехнической комиссией [10]. В трудах по механике грунтов рассматриваемый метод был назван методом пенетрации и затем стал широко использоваться [10].

Конические пластометры для исследования дисперсных систем в различных областях технологии стали активно применяться после публикации работы П.А. Ребиндера и Н.А. Семененко [11].

Ключевым вопросом при использовании рассматриваемого метода был и остается вопрос о воспроизводимости и инвариантности итоговых данных. До настоящего времени нет, несмотря на более чем тридцатилетнюю практику применения вышеназванных пластометров, единого мнения о степени инвариантности результатов измерений. В работе [10] приводятся взятые из многих источников данные по пенетрации грунтов, которые свидетельствуют, что при различных глубинах погружения конуса, если эти глубины более 10–15 мм, данные по удельному сопротивлению пенетрации (пропорциональному пластической прочности) инвариантны. П.А. Ребиндер и Н.А. Семененко в источнике [11] также говорят о наличии инвариантности. В то же время в статьях [12, 13] пишут об отсутствии инвариантности данных по пластической прочности, полученных при различных глубинах погружения конуса, причем нарушение инвариантности тем больше, чем меньше глубина погружения. Кроме того, указывают, что для систем с малой пластической прочностью нарушения инвариантности наблюдаются и при постоянных глубинах погружения в зависимости от величины угла при вершине конуса (чем этот угол ближе к  $90^\circ$ , тем больше нарушение).

В многочисленных работах (например, [14]) технологи, использующие конические пластометры, на инвариантность конечных данных не обращают внимание.

Еще в 1948 г. П.А. Ребиндер и Б.Я. Ямпольский в работе [13] писали о нежелательности имеющегося ускорения в движении индентора в пластометрах с падающим конусом. В дальнейшем влияние этого фактора на измерения не учитывалось. Прямое определение величины сил инерции, связанных с переменной скоростью погружения падающего конуса в исследуемую среду [15], показало, что эти силы могут достигать половины величины тех сил, под действием которых рассчитывается внедрение конуса по существующей методике. Величина сил инерции зависит также от того, с какой скоростью производится снятие груза, вызывающего движение неуравновешенного конуса. Для исключения воздействия силы инерции на измерения в работе [15] был предложен пластометр с постоянной скоростью погружения конуса, движение которого не связано со снятием груза. Во время работы конус остается неподвижным, а его внедрение

происходит за счет подъема электроприводом столика, на котором находится образец, с заданной постоянной скоростью.

Использование пластометра с постоянной скоростью погружения конуса увеличило воспроизводимость измерений [15], но, как оказалось [16], не устранило их неинвариантности. Данные по пластической прочности одного и того же материала, полученные при разных глубинах погружения конуса, разных углах при его вершине, заметно различались между собой. Оказалось, что и величина скорости, с которой внедряется конус, также влияет на результаты измерений. Эта неинвариантность была связана не с конструкцией прибора, а с теорией метода, которая устанавливала бы новый подход к раскрытию связи между параметрами, характеризующими условия внедрения конуса, и свойствами среды. В этой связи предпринимались различные попытки [17–20] с разными материалами и в рамках многих отраслей промышленности, направленные на усовершенствование методики определения пластической прочности или предельного напряжения сдвига (что по отношению к последнему термину в традиционном методе конического пластометра звучит не вполне корректно), но ученые ограничивались нахождением только обозначенной выше реологической характеристики и не ставили целью определение как минимум еще одной важнейшей характеристики – эффективной вязкости, что заранее обусловило недостаточное соответствие указанных методик современным требованиям технологии строительных материалов.

Основное отличие предлагаемой методики состоит в том, что в условиях отсутствия влияния сил инерции на погружение конуса в среду появляется возможность вместо пластической прочности определять текущие значения напряжения сдвига в слое материала, прилегающем к поверхности конуса, и на основании непрерывной или дискретной зависимости напряжения сдвига от градиента скорости сдвига, который связан с глубиной погружения конуса, получать реологические характеристики, а именно предельное напряжение сдвига и вязкость.

Главное предположение рассматриваемой методики: направление движения частиц среды в слое материала, прилегающем к поверхности конуса, происходит параллельно образующей конуса (рис. 1).

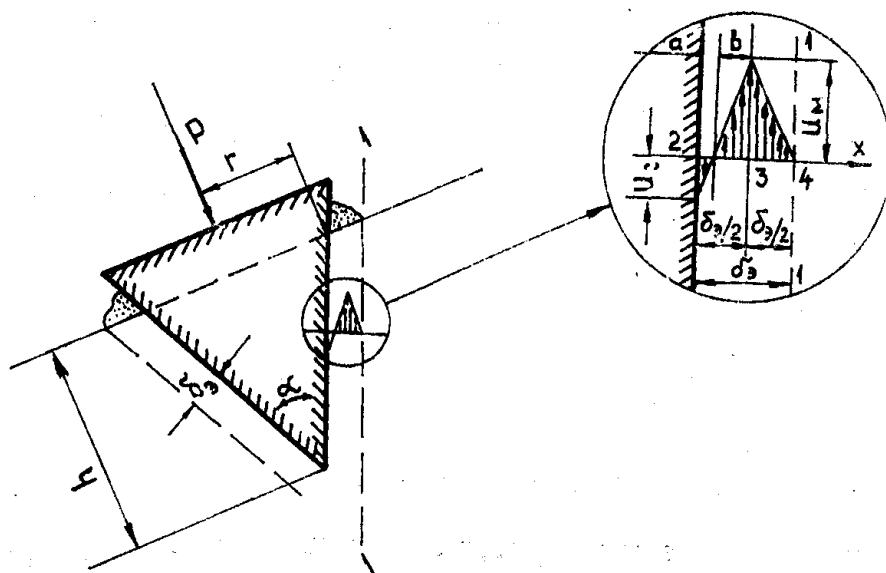


Рис. 1. Схема движения среды при погружении конуса

Частицы среды, прилегающие к шероховатой поверхности конуса, будут двигаться вместе с конусом. Скорость этих частиц  $U_c$  в указанном направлении можно выразить как

$$U_c = U_k \cdot \cos \frac{\alpha}{2},$$

где  $U_k$  – скорость погружения конуса в направлении, перпендикулярном поверхности среды.

На граничной поверхности 1–1, разделяющей движущийся поток и неподвижную среду, скорость частиц равна нулю. Вместо неизвестной истинной толщины деформируемого слоя среды введем эквивалентную ей величину  $\delta_3$ , одинаковую у всей погруженной поверхности конуса. Будем считать, что толщина слоя среды, прилипающего к поверхности конуса и движущегося вместе с ним, настолько мала, что ею можно пренебречь. Тогда из принятого положения об отсутствии сжатия среды должно выполняться условие: при погружении конуса на глубину  $dh$  приращение объема погруженной части конуса  $dV$  должно быть равно объему выдавливаемой из лунки среды  $dS \cdot \delta_3$  ( $dS$  – приращение боковой поверхности конуса при погружении его на глубину  $dh$ ). Это условие можно записать так:

$$\frac{dS}{dh} \cdot \delta_3 = \frac{dV}{dh}. \quad (1)$$

Выразив через  $h$  боковую поверхность конуса  $S$  ( $S = \frac{\pi h^2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}$ ) и его объем  $V$  ( $V = \frac{1}{3} \pi h^3 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}$ ), после дифференцирования и подстановки в выражение (1) вычислим  $\delta_3$ :

$$\delta_3 = 1/2 \sin \frac{\alpha}{2} \cdot h.$$

Распределение скоростей движения среды в обтекающем конус потоке находим, приняв данные ниже соображения.

Между двумя поверхностями, разделяющими движущийся поток и неподвижную среду (см. рис. 1), будет существовать течение, направленное в сторону, противоположную движению конуса, и выносящее частицы из лунки на поверхность среды. Примем, что максимальная скорость в этом течении приходится на середину толщины деформируемого слоя и равна  $U_m$ . Эпюра скоростей в потоке, построенная на основе принятых допущений, показана выше (см. рис. 1).

Найдем среднее значение градиента скорости в потоке, обтекающем конус. Согласно условию неразрывности потока, при одинаковой вдоль образующей конуса толщине деформируемого слоя  $\delta_3$  средняя скорость в потоке  $U_n$  как у вершины конуса, так и на выходе выдавливаемой смеси из лунки будет одинаковой. Определим эту скорость на выходе из лунки. При погружении конуса на глубину  $h$  выдавливание смеси из лунки будет происходить по кольцевому сечению площадью

$$F_n = \pi \left[ \left( r + \frac{\delta_3}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right)^2 - r^2 \right] \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Для упрощения вычислений, учитывая, что

$$\left(\frac{\delta_3}{\cos \frac{\alpha}{2}}\right)^2 \ll 2r \frac{\delta_3}{\cos \frac{\alpha}{2}},$$

в дальнейшем будем считать  $F_{\Pi} = 2\pi r \delta_3$ . Очевидно, что скорость  $U_{\Pi}$  получим из условия

$$\frac{dV}{dt} = F_{\Pi} \cdot U_{\Pi}, \quad (2)$$

где  $\frac{dV}{dt}$  – производная по времени от объема погруженной части конуса (объема лунки).

В формуле для объема погруженной части конуса  $V = 1/3\pi r^2 h$  выразим  $r$  через  $h$ :  $r = h \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ , а  $h$  – через скорость и продолжительность опускания конуса:  $h = U_k \cdot t$ . Подставив в выражение для объема  $V$  найденные значения  $r$  и  $h$  и продифференцировав по  $t$ , используя выражение (2), найдем

$$U_{\Pi} = U_k \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = U_c. \quad (3)$$

Средняя скорость смеси, выдавливаемой из лунки, или средняя скорость в потоке в направлении, противоположном движению конуса, оказывается равной проекции скорости погружения конуса на направление его образующей.

Очевидно, что площадь эпюры скоростей, показанная на рис. 1, если считать скорости, направленные вверх с положительным, вниз – с отрицательным знаками, будет равна произведению средней скорости в потоке  $U_{\Pi}$  на толщину деформируемого слоя  $\delta_3$ :

$$-1/2aU_c + 1/2bU_m + 1/4\delta_3 U_m = \delta_3 U_{\Pi}. \quad (4)$$

Заменив в последнем уравнении  $U_{\Pi}$  равной ей величиной  $U_c$  и приняв во внимание геометрические соотношения  $\frac{U_m}{U_c} = \frac{b}{a}$ ;  $a + b = 0,5\delta_3$  (см. рис. 1), найдем значения

$$a = 0,5\delta_3 \frac{1}{1 + \frac{U_m}{U_c}}$$

и

$$b = 0,5\delta_3 \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{U_m}{U_c}}\right).$$

Подставив значения  $a$  и  $b$  в выражение (4) и обозначив  $\frac{U_m}{U_c} = z$ , получим уравнение  $z^2 - 3z - 4 = 0$ , из которого вычислим  $z = \frac{U_m}{U_c} = 4$  или (с учетом равенства (3))  $U_m = 4U_c = 4U_k \cos \frac{\alpha}{2}$ .

Определив величины скоростей, показанных на эпюре (см. рис. 1), можно перейти к расчету среднего значения градиента скорости в потоке, обтекающем конус. При этом ось  $x$  направим перпендикулярно образующей конуса. Среднее значение градиента в потоке найдем как половину суммы градиентов скорости на участках 2–3 и 3–4 (см. эпюру

на рис. 1), считая градиенты положительными, если с увеличением  $x$  скорость возрастает, и отрицательными, если она убывает:

$$\left(\frac{dU}{dx}\right)_{cp} = \frac{1}{2} \left[ \frac{U_m - (-U_c)}{0,5\delta_3} - \frac{U_m}{0,5\delta_3} \right] = \frac{1}{2} \left( \frac{5U_c}{0,5\delta_3} - \frac{4U_c}{0,5\delta_3} \right) = \frac{U_c}{\delta_3}.$$

Подставим в последнее выражение значения  $U_c$  и  $\delta_3$ , определенные ранее, и получим

$$\left(\frac{dU}{dx}\right)_{cp} = \frac{U_c}{\delta_3} = \frac{U_k \cos \frac{\alpha}{2}}{1/2 \sin \frac{\alpha}{2} h} = 2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{U_k}{h} = K \frac{U_k}{h}, \quad (5)$$

где  $K = 2 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$ .

Схема для расчета зависимости между силой и деформацией при движении конуса представлена на рис. 2а. Вырезанная с поверхности конуса площадка скользит по поверхности среды бесконечной глубины. Эпюра скоростей в деформируемом при движении площадке слое среды необычна и имеет вид, показанный на рис. 2. Условия, за счет которых создается такое распределение скоростей, были рассмотрены выше. Эта схема отличается от классической (рис. 2б) характером эпюры скоростей, а также тем, что при постоянной скорости движения площадки толщина слоя  $\delta$ , в нашем случае переменна согласно выражению (2), а в классической схеме она постоянна.

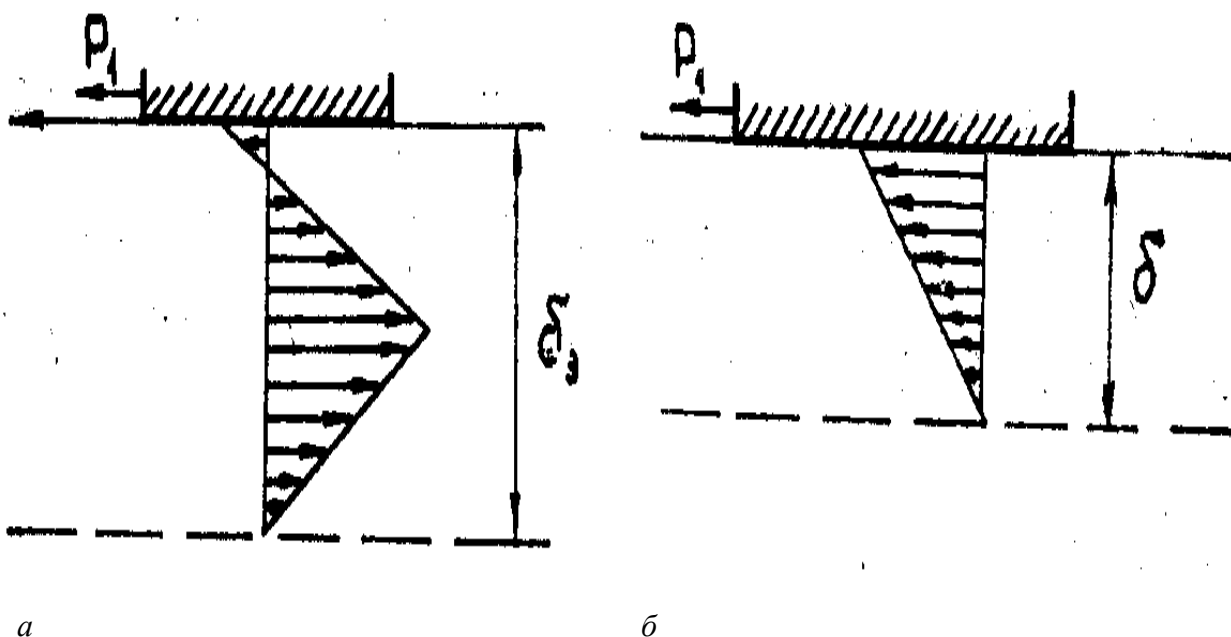


Рис. 2. Эпюры скоростей в деформируемом слое среды в схеме:  
а – для расчета зависимости между силой и деформацией  
при движении конуса; б – классической

Зависимость между градиентом скорости в обтекающей площадке потока и силой  $P_1$  (или напряжением сдвига на границе между площадкой и средой  $\sigma = \frac{P_1}{F_1}$ , где  $F_1$  – поверхность, по которой площадка соприкасается со средой) для ньютоновских жидкостей описывается уравнением Ньютона. Для пластично-вязких сред, подчиняющихся уравнению Шведова – Бингама, к которым относятся многие сырьевые смеси, используемые в производстве строительных материалов, указанная зависимость будет выглядеть следующим образом:

$$\sigma = \sigma_0 + \eta \frac{dU}{dx}. \quad (6)$$

Если в соответствии с рассмотренной схемой применяется уравнение (6) для описания внедрения конуса в пластично-вязкую среду, напряжение сдвига  $\sigma$  на поверхности конуса определяется в момент уравнивания силы, действующей на конус со стороны поднимающегося со скоростью  $U_k$  образца среды, весом конуса  $P$ . Тогда величина  $\sigma$  подсчитывается по известной формуле [2]:

$$\sigma = \frac{P}{S} \cos \frac{\alpha}{2} = K_1 \frac{P}{h^2},$$

где  $S$  – проекция боковой поверхности конуса на плоскость, перпендикулярную оси конуса.

Вместо  $\frac{dU}{dx}$  в уравнение (5) подставляется найденное среднее значение градиента скорости сдвига  $K \frac{U_k}{h}$ .

Выполнив указанные подстановки, получим расчетное уравнение для определения предельного напряжения сдвига  $\sigma_0$  и вязкости  $\eta$  пластично-вязкой среды на конусном пластометре, работающем при постоянной скорости внедрения конуса:

$$K_1 \frac{P}{h^2} = \sigma_0 + \eta K \frac{U_k}{h}. \quad (7)$$

где  $K$  и  $K_1$  – постоянные, зависящие от угла при вершине конуса  $\alpha$ .

Признаком, по которому можно судить, соответствует ли уравнение (7) экспериментальным данным, является расположение на одной прямой экспериментальных точек, полученных при измерениях глубин внедрения конуса  $h$  при различных значениях  $P$ , постоянной скорости его движения  $U_k$  и нанесенных на график в координатах  $\sigma = K_1 \frac{P}{h^2} - \frac{U_k}{h}$ .

На рис. 3 показаны графики зависимостей  $\sigma = f\left(\frac{U_k}{h}\right)$  для уплотненной прессованием смеси из одной части молотого песка с удельной поверхностью  $300 \text{ м}^2/\text{кг}$  и трех частей Вольского песка естественной дисперсности при пористости 42 % и влажности 4 %. Экспериментальные точки для каждой из трех скоростей погружения конуса  $U_k$ , равных 0,029, 0,058 и 0,116 см/с, располагаются на прямых, которые сходятся в точке, соответствующей  $\sigma_0$ . Тангенс угла наклона прямых к горизонтальной оси равен вязкости  $\eta \cdot K$ . Графики показывают, что экспериментальные точки хорошо располагаются на прямых. Следовательно, уравнение (7) соответствует экспериментальным данным, а величина предельного напряжения сдвига инвариантна к изменениям глубины и скорости погружения конуса.

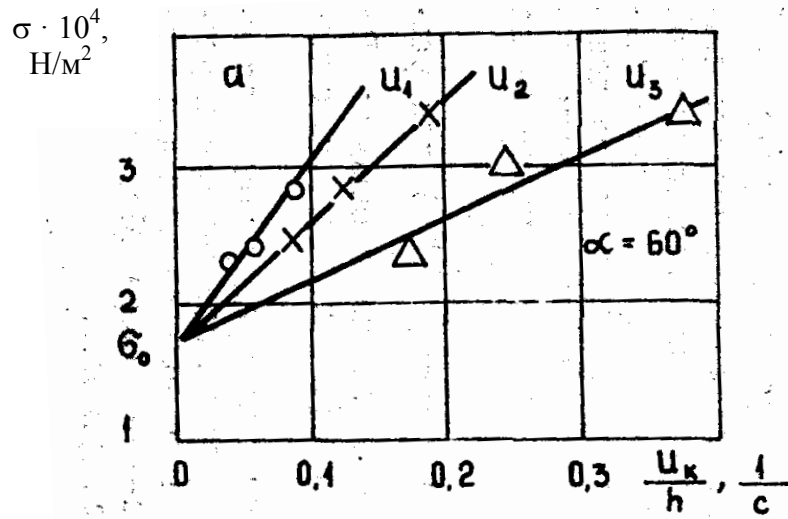


Рис. 3. Зависимости напряжения сдвига от градиента скорости сдвига для смеси из одной части молотого песка с удельной поверхностью  $300 \text{ м}^2/\text{кг}$  и трех частей Вольского песка естественной дисперсности при пористости 42 % и влажности 4 %

На рис. 4 изображено сравнение данных по предельному напряжению сдвига, полученных на коническом пластометре и рассчитанных по изложенной теории, с реологическими характеристиками, полученными для того же материала по методу Вейлера – Ребиндера. Можно отметить вполне удовлетворительную сходимость.

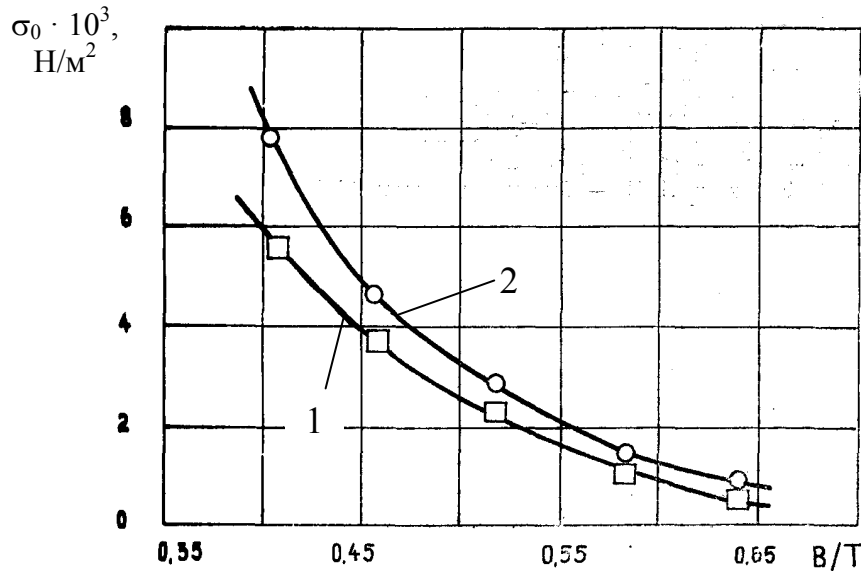


Рис. 4. Зависимости предельного напряжения сдвига от водотвердого отношения (В/Т) для глиняного теста, полученные по методу Вейлера – Ребиндера (1) и на конусном пластометре по предлагаемой методике (2)



Из уравнения (7) следует, что с увеличением глубины погружения конуса ее влияние на величину  $\sigma_0$  (а следовательно, на степень неинвариантности измерений  $\sigma_0$ ) уменьшается. К такому же выводу пришли (но исходя из других соображений) в статье [12].

В работах по пенетрации грунтов [10] указывается, что истинная величина удельной прочности пенетрации достигается при  $h \rightarrow \infty$ . Такой же вывод следует и из уравнения (7). На этом основании пенетрационные испытания грунтов ведутся при глубинах погружения конуса более 15 мм. Изучение свойств дисперсных систем в технологии производится обычно при глубинах менее 10 мм. В этом одна из причин большей инвариантности измерений при пенетрации грунтов по сравнению с исследованиями технологов.

Применение рассмотренной методики расчета пластично-вязких характеристик превращает пластометр в конусный реометр, на котором можно измерять как предельное напряжение сдвига, так и вязкость дисперсных систем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейлер С.Я., Ребиндер П.А. Исследования упругопластических свойств и тиксотропии дисперсных систем (суспензий, эмульсий и коллоидных растворов) // *Доклады АН СССР*. 1945. Т. 49. № 5. С. 354–357.
2. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Исследование золь-гель перехода реологическими методами. Часть I. Методы проведения экспериментов // *Нанотехнологии в строительстве*. 2017. Т. 9. № 4. С. 74–92.
3. Новые физические методы исследования торфа / под ред. проф. М.П. Воларовича и канд. техн. наук Н.В. Чураева. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 228 с.
4. Киреев В.Н., Мухутдинова А.А., Урманчиев С.Ф. О критических условиях теплообмена при течении жидкости с немонотонной зависимостью вязкости от температуры в кольцевом канале // *Прикладная математика и механика*. 2023. Т. 87. № 3. С. 369–378.
5. Parteli E., Schmidt J., Blumel C., Wirth K.-E., Peukert W., Poschel T. Attractive particle interaction forces and packing density of fine glass powders. URL: [https://www.researchgate.net/publication/265299478\\_Attractive\\_particle\\_interaction\\_forces\\_and\\_packing\\_density\\_of\\_fine\\_glass\\_powders](https://www.researchgate.net/publication/265299478_Attractive_particle_interaction_forces_and_packing_density_of_fine_glass_powders) (дата обращения: 03.09.2024).
6. Ku N., Hare C.L., Ghadiri M., Murtagh J.M., Oram P., Haber R.A. Auto-granulation of fine cohesive powder by mechanical vibration // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 102, pp. 72–80.
7. Bakkar S., Wall M., Ku N., Berman D., Aouadi S., Brennan R.E., Young M.L. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites produced using magnetic field-assisted freeze-casting of porous ceramic structures. URL: [https://www.researchgate.net/publication/350477052\\_AlAl2O3\\_metal\\_matrix\\_composites\\_produced\\_using\\_magnetic\\_field-assisted\\_freeze-casting\\_of\\_porous\\_ceramic\\_structures](https://www.researchgate.net/publication/350477052_AlAl2O3_metal_matrix_composites_produced_using_magnetic_field-assisted_freeze-casting_of_porous_ceramic_structures) (дата обращения: 03.09.2024).
8. Белов В.В. Капиллярная аутогезия в трехфазных сырьевых смесях. *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации: Сборник научных трудов*. М.: РААСН, 2019. С. 58–68.
9. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Основные подходы к моделированию процессов отверждения в нанодисперсных силикатных системах. Ч. III // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 1. Ч. 2. С. 52–86.
10. Разоренов В.Ф. Пенетрационные испытания грунтов. М.: Стройиздат, 1968. 182 с.

11. Ребиндер П.А., Семенов Н.А. О методике погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел // *Доклады АН СССР*. 1949. Т. 14. № 6. С. 20–25.
12. Гораздовский Т.Я., Ребиндер П.А. К теории конического пластометра // *Коллоидный журнал*. 1970. Т. 32. № 4. С. 512–519.
13. Ямпольский Б.Я., Ребиндер П.А. Исследование структурно-механических свойств металлических дисперсных систем методом конического пластометра // *Коллоидный журнал*. 1948. Т. 6. С. 466–469.
14. Закипная Е.В., Зарицкая В.В. Реология: учебное пособие. Благовещенск: Изд-во Дальневосточного ГАУ, 2015. 108 с.
15. Берней И.И. Исследование структурно-механических пластично-вязких сред на конических пластометрах // *Строительные материалы*. 1973. № 7. С. 45–47.
16. Берней И.И., Белов В.В. Теория и метод измерения вязкости и предельного напряжения сдвига дисперсных систем на усовершенствованном коническом пластометре // *Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума*. Рига: РПИ, 1979. С. 144–146.
17. Веретенникова М.А., Степанова Э.Ф., Провоторова С.И., Смирных А.А. Структурно-механические исследования в разработке карандашей // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21279> (дата обращения: 04.09.2024).
18. Пшеничный Г.Н. Установка для изучения структурообразования цементных систем // *Технологии бетонов*. 2013. № 10 (87). С. 21–23.
19. Прокофьев В.Ю. Экспериментальные методы в технологии порошковых и компактированных материалов: учебное пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2015. 117 с.
20. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Анализ методов определения пределов пластичности грунтов // *Научные труды КубГТУ*. 2015. № 10. С. 340–356.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*БЕЛОВ Владимир Владимирович* – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 1. Теоретическое обоснование метода // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 72–82.

**DETERMINATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES  
OF SOLID DISPERSED SYSTEMS USED IN THE PRODUCTION  
OF BUILDING MATERIALS  
APPLYING CONE PENETRATION TECHNIQUE.  
PART 1. THEORETICAL JUSTIFICATION  
OF THE METHOD**

*V.V. Belov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** It is noted that penetrometry based on immersion of a conical indenter into the studied medium has great advantages for determining the rheological characteristics of structured dispersed systems. It is indicated that the main problem in the use of conical plastometers is the reliability of the results obtained. It has been demonstrated that most compacted three-phase systems are solid-like and their recovery periods of broken bonds are shortened. For such systems, a method for determining rheological characteristics using a penetration rheometer has been developed and considered based on model representations of the deformation pattern of the medium in the zone of cone insertion with a constant velocity. It is concluded that the application of the described technique makes it possible to measure both the limiting shear stress and the viscosity of structured dispersed systems.

**Keywords:** rheological characteristics, penetrometry, structured dispersed systems, limiting stress, shear, viscosity, cone penetration method, deformation of the medium, cone.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

*BELOV Vladimir Vladimirovich* – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Belov V.V. Determination of rheological properties of solid dispersed systems used in the production of building materials applying cone penetration technique. Part 1. Theoretical justification of the method // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 72–82.