

**Кривые течения и фракционный состав  
твёрдого сапропелевой суспензии**

Кислов Н.В.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Возрастающий дефицит природного органического сырья обуславливает необходимость освоения ресурсов сапропелевых отложений в озерах Республики Беларусь. Это связано также с прогрессирующими процессами заиления озёр, что приводит к негативным последствиям сокращения водного баланса озёр и ухудшению качества воды, снижению возможностей рыбоводства и рекреации.

Практика показывает [1, 2, 5] возможность широкого использования сапропелей прежде всего для производства различных видов удобрений и кормовых добавок. Отдельные виды сапропелей используются в медицине, перспективны для приготовления буровых растворов, технологических добавок для производства пористых керамических изделий, керамзита, связующего для получения древесноволокнистых плит и т.д.

Разнообразие условий залегания сапропелевых отложений (в озерах, под торфяной залежью, в старицах рек, искусственных водоемах), широкий диапазон физического состояния залежей (малозольные отложения, минеральные илы, карбонатные отложения), большое различие по размерам площадей и глубин залегания требуют дифференцированного подхода к выбору и применению соответствующих конкретным условиям технологий добычи, транспортирования и обезвоживания сапропелей [1, 3].

В настоящее время нашли применение следующие способы добычи сапропелей: гидромеханизированный в двух вариантах для больших и малых водоемов; грейферный; экскаваторный для извлечения сапропелей, залегающих под торфом; канатно-скреперный. Каждый из этих способов ориентирован на добычу сапропелей с учетом конкретных условий их залегания, химического состава и физико-механических свойств.

Цель настоящего исследования заключалась в оценке влияния реологического фактора на процессы переноса сапропелевой суспензии при ее гидротранспорте, определении напряжений сдвига в зависимости от концентрации смеси и оценке фракционного состава

твердого в пульпе. Эти данные необходимы для определения энергозатрат на гидротранспорт сапропелевой суспензии. Последнее обусловлено тем, что к настоящему времени накоплен достаточный экспериментальный материал и производственный опыт по добыче сапропелей, а также зарубежный опыт по реставрации озер, которые подтверждают перспективность применения гидромеханизованного способа добычи сапропелей [1, 5]. С использованием земснаряда, оборудованного широкозахватным грунтозаборным устройством конфузорного типа, он обеспечивает наиболее полную и упорядоченную выработку залежи без ее взмучивания, в результате чего образуется плавный рельеф дна. Гидромеханизованный способ позволяет получать конечную продукцию, отвечающую техническим требованиям: влага  $50 \pm 5$  %, фракционный состав – содержание фракций сапропеля более 10 мм не превышает 15 %. Технологический процесс – послойный намыв, первичная переработка, хранение в штабелях – увеличивают агрохимический и биологический потенциал удобрений, улучшают свойства добытого сапропеля как сырья для получения других видов продукции [1].

Сапропели характеризуются высокой дисперсностью. Содержание фракций меньше 50 мкм составляет 45-50 %, средневзвешенный размер частиц – 110÷130 мкм. Структура сапропелей обусловлена сложностью и многообразием биологических процессов, протекающих в водоемах, а также микробиологической деятельностью и деструкцией органического вещества. Плотность сапропелей изменяется в пределах 1400÷2700 кг/м<sup>3</sup>. По величине математического ожидания плотность сапропелей располагается в следующем порядке: органические – 1610 кг/м<sup>3</sup>; смешанные – 1970 кг/м<sup>3</sup>; карбонатные – 2060 кг/м<sup>3</sup>; кремнеземистые – 2240 кг/м<sup>3</sup>. Сапропели в естественном состоянии обладают высокой пластичностью, липкостью, резко выраженной способностью к усадке при высыхании, незначительной водопроницаемостью [1, 2].

В работах [1, 2] были получены данные для оценки оптимального содержания твердого вещества (концентрации)  $\mu_{оп}$  в сапропелевой пульпе от ее зольности  $A$ . Оказалось, что при изменении  $A$  от 30 до 70 % величина  $\mu_{оп}$  увеличивается в пределах 3÷8 %. На практике перекачиваемая пульпа содержит только 50-70 % твердого от оптимальной концентрации. В итоге реально ожидаемая концентрация

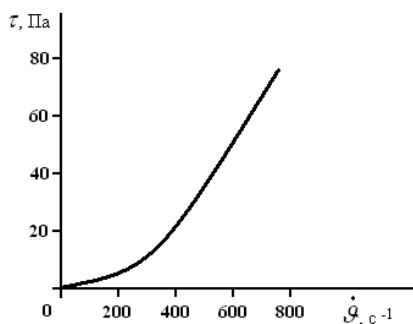
$\mu_p$  сапропелевой суспензии может составить 2,15-5,40 %. Эксперименты, выполненные на ряде озер, подтвердили эти данные. Так, например, для озера Мотольское концентрация сапропелевой суспензии  $\mu_p$  составила 4,84 % (в долях единицы  $\mu_p = 0,0484$ ). В общем случае зависимость  $\mu_{оп} = f(A)$  при условии, что  $\mu_{оп}$  и  $A$  выражены в долях единицы, подчиняется закономерности

$$\mu_{оп} = 0,02 + 2,3 \cdot 10^{-3} e^{46A}. \quad (1)$$

При гидротранспорте сапропелевой пульпы в состав измельченной твердой фазы входят компоненты сапропеля, песок и случайные крупные включения. При этом песок в пульпе наличествует как за счет эрозии почв, так и вследствие захвата его заборным устройством земснаряда. Суспензия сапропеля, очищенная от примесей, образует устойчивую коллоидную структуру, проявляющую нелинейновязкопластичные свойства в диапазоне скоростей сдвига, характерных для ее гидротранспорта. Осадок на нижней части трубы состоит из песка и случайных посторонних включений. Эти включения имеют более высокую плотность, чем у компонентов сапропеля и являются более крупными. Используя принцип мультипликативности [2], можно допустить правомерность рассмотрения суспензии из мелких фракций как однородной сплошной дисперсной среды по отношению к крупным фракциям. Тогда на динамику течения будут влиять тонкодисперсные фракции, образующие вместе с водой однородную жидкость относительно большой плотности. Поэтому за несущую среду в таком потоке можно принять тонкодисперсную гидросмесь, а механической примесью в ней будут крупные частицы. Такую гидросмесь можно рассматривать как бы состоящей из «тяжелой» несущей жидкости, перемещающей крупные частицы. Поэтому при анализе течения сапропелевой пульпы представляется целесообразным исследовать реодинамику собственно сапропелевой суспензии. Заметим здесь, что в реальных условиях доля песка по массе при гидротранспорте сапропелевой пульпы не превосходит 7-12 %, то есть объемная доля песка соответствует интервалу концентраций, в котором влиянием крупных тяжелых частиц можно пренебречь [1, 2].

Определение реологических характеристик сапропелевой су-

пензии было выполнено методом трубной вискозиметрии, который основан на использовании зависимости касательных напряжений  $\tau$  в потоке от градиента скорости сдвига  $\dot{\vartheta}$ . Эксперименты были выполнены с сапропелевой суспензией озера Мотольское. Зольность  $A$  составляла 67,7 %, содержание собственно сапропеля в суспензии изменялось в пределах  $\mu = 1,26 \div 5,08$  %. В качестве примера на рис. 1 приведена кривая течения  $\tau = f(\dot{\vartheta})$  сапропелевой суспензии озера Мотольское при  $\mu = 4,84$  %.



Анализ полученных кривых течения для различных  $\mu$  показал, что они имеют вид, близкий к степенной зависимости со свободным членом. Это позволяет отнести сапропелевую суспензию к неньютоновской жидкости и ее реологическое состояние описать моделью Балкли-Гершеля

Рис. 1. Кривая течения сапропелевой суспензии при  $\mu = 0,0484$  кг/кг

$$\tau = \tau_0 + k \left( \frac{d\vartheta}{dr} \right)^n, \quad (2)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига;  $\tau_0$  – предел текучести (сцепление);  $\dot{\vartheta} = d\vartheta/dr$  – градиент скорости сдвига;  $k$  – коэффициент, характеризующий разжижение суспензии;  $n$  – характеристика отклонения свойств суспензии от ньютоновской жидкости.

Зависимость (2) с учетом концентрации сапропеля в суспензии  $\mu = (0,0126 \div 0,0508)$  кг/кг и изменении  $\dot{\vartheta}$  от 100 до 800 с<sup>-1</sup> имеет вид:

$$\tau = \tau_0 + 4 \cdot 10^{-4} (1 + \mu) \cdot \dot{\vartheta}^{1,8}. \quad (3)$$

При этом предел текучести (сцепление) описывается зависимостью  $\tau_0 = \tau_{00} \cdot \exp[\alpha \cdot \mu] = 0,021 \cdot \exp[81 \cdot \mu]$ . Тогда окончательно

кривые течения сапропелевой суспензии подчиняются закономерности

$$\tau = 0,021 e^{81\mu} + 4 \cdot 10^{-4} (1 + \mu) \cdot \dot{\gamma}^{1,8}. \quad (4)$$

Коэффициент разжижения сапропелевой суспензии  $k = 0,0004$  по мере увеличения ее концентрации  $\mu$  в пределах  $0,0126 \div 0,0508$  кг/кг незначительно влияет на напряжение сдвига  $\tau$ . При этом величина предела текучести  $\tau_0$  с увеличением  $\mu$  возрастает почти в 22 раза (с 0,06 до 1,30 Па). Следовательно, сапропелевая суспензия в состоянии покоя обладает значительно большим сцеплением, чем несущая среда.

Таким образом, сапропелевая суспензия является неньютоновской жидкостью и проявляет псевдопластические свойства. Реологическое состояние суспензии при  $\mu = \text{const}$  описывается моделью (2) Балкли-Гершеля, а также ее модификацией (4), учитывающей концентрацию  $\mu$ . Зависимость  $\tau = f(\dot{\gamma}, \mu)$  необходима для моделирования процесса массопереноса при течении сапропелевой суспензии в системах гидротранспорта и оценки затрат мощности на этот процесс.

При гидротранспорте сапропелевой суспензии по трубам неравномерность распределения концентраций гидросмеси по вертикали характеризуется фракционным составом сапропеля, который является определяющим фактором при оценке его физических свойств и структуры, используется при выборе типа, параметров и режимов работы технологического оборудования и оказывает непосредственное влияние на затраты мощности при транспортировании гидравлическим способом.

С точки зрения математической статистики образец любого измельченного материала можно рассматривать как статистический коллектив, который состоит из членов, варьирующих по размеру  $d$  частиц и выходам  $p$  отдельных фракций. При обработке опытных данных помимо выходов в процентах к общей массе пробы определяются *суммарные (кумулятивные) выходы*  $P_i$ . *Суммарным выходом по плюсу*  $P(d)$  называют выход частиц крупнее данного размера. Он получается сложением относительных выходов частиц, размеры которого больше заданного. Если сложить выходы меньше данного размера, то получим *суммарный выход по минусу*  $P_T(d)$ . Естествен-

но, что  $P = 100 - P_1(d)$ .

Экспериментальная часть исследования была выполнена на лазерном микроанализаторе «Анализетт -22» фирмы FRIISH (Германия) [2]. В результате были получены графические зависимости суммарных выходов по минусу  $P_1(d)$  состава твердого в сапропелевых суспензиях месторождений озер Червоное и Мотольское. При дальнейшей обработке опытных данных оказалось, что суммарные выходы по плюсу  $P$  фракций сапропеля в координатах  $\lg(\lg 100/P) - \lg d$  спрямляются с изломом в области, соответствующей размерам частиц  $d = 25 \div 30$  мкм (рис. 2) [2].

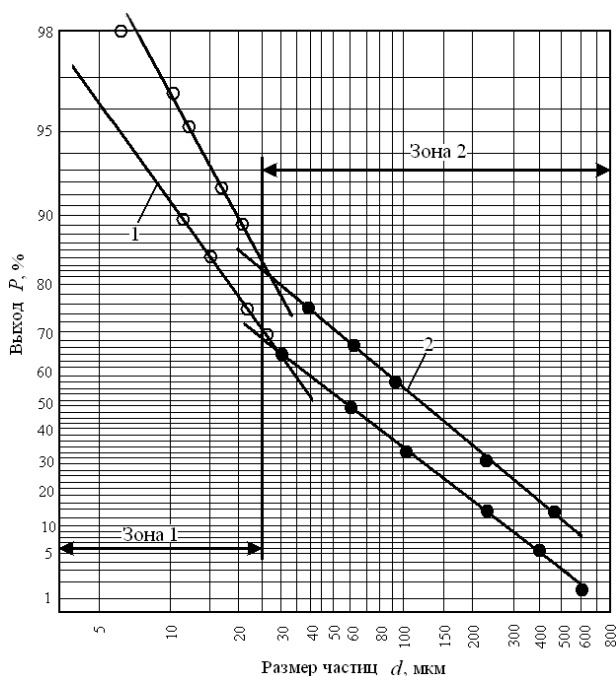


Рис. 2. Зависимость суммарных выходов  $P$  по плюсу от размеров  $d$  частиц сапропеля озер Мотольское (1) и Червоное (2)

Рассмотрим сначала случай, когда зависимость  $P = f(d)$  представляет собой прямую линию в координатах  $\lg(\lg 100/P) - \lg d$

практически во всем диапазоне изменения переменных  $P$  и  $d$ . В этом случае угловой коэффициент  $n$  прямой, представляющий собой характеристику неоднородности по размерам частиц их полидисперсной смеси, можно определить практически по двум экспериментальным точкам, которые соответствуют некоторым суммарным выходам по плюсу  $P_1$  и  $P_2$  на ситах с размерами отверстий  $d_1$  и  $d_2$ . Тогда

$$n = \frac{\lg(2 - \lg P_1) - \lg(2 - \lg P_2)}{\lg d_1 - \lg d_2}. \quad (5)$$

В качестве одной из произвольно выбранных на прямой  $\lg(2 - \lg P) - \lg d$  точки может быть размер частиц  $d_k$  для фиксированного значения  $P_k$ . Пусть  $d_m$  представляет собой размер частиц  $d_m$ , при котором суммарный выход  $P_m = 50\%$ , т.е.  $d_m$  является медианным размером, так как делит всю совокупность фракций полидисперсной смеси поровну. Следовательно, суммарная масса всех частиц с размерами больше  $d_m$  равна суммарной массе частиц размером меньше  $d_m$ . В этом случае формула (5) принимает вид:

$$n = \frac{\lg(2 - \lg P) - \lg(2 - \lg P_m)}{\lg d - \lg d_m}, \quad (6)$$

где  $P$  и  $d$  – выбранные на прямой значения суммарных выходов по плюсу в % и соответствующие им размеры частиц в мкм;  $d_m$  – медианный средний размер частиц полидисперсной смеси, мкм;  $P_m = 50\%$  – суммарный выход частиц, размер которых равен  $d_m$ .

После преобразований и потенцирования зависимость (6) принимает вид

$$P = 100 \cdot 2^{-(d/d_m)^n}. \quad (7)$$

Заметим, что параметры  $n$  и  $d_m$  этой формулы имеют вполне конкретный физический смысл. Они характеризуют соответственно неоднородность полидисперсной смеси частиц по фракциям и ее медианный размер, который в рассматриваемом случае определяется по формуле

$$d_{\Sigma} = d_i \sqrt[n]{\frac{\lg 2}{2 - \lg P_i}} \quad (8)$$

где  $P_i$  – величина суммарного выхода по плюсу частиц размером больше  $d_i$ .

Формула (7) представляет собой интегральную кривую распределения частиц по фракциям. Продифференцировав ее, получим выражение для дифференциальной кривой распределения

$$P'(d) = \frac{P_i}{\Delta d} = 100 \cdot n d_{\Sigma}^{-n} \cdot d^{n-1} \cdot 2^{-(d/d_{\Sigma})^n} \cdot \ln 2. \quad (9)$$

Максимум на кривой распределения существует при  $n > 1$ .

С уменьшением  $n$  кривая распределения (9) принимает все более пологий вид. Если  $n \leq 1$ , то максимум в области положительных значений  $d$  отсутствует.

Математическая обработка данных, полученных с помощью лазерного микроанализатора «Анализетте-22», показала, что при изменении размеров частиц сапропеля от 10 до 800 мкм (озеро Мотольское) и от 5 до 400 мкм (озеро Червоное) тонкодисперсная составляющая ( $\bar{d} = 5-25$  мкм) характеризуется относительной однородностью фракций по их размерам ( $n = 1,72$  и  $1,92$ ). При этом расчетные медианные средние  $\bar{d}_{\Sigma} = 40$  и  $57$  мкм. Что же касается фракций с  $\bar{d} > 25$  мкм, то их однородность невелика ( $n = 0,74$  и  $0,89$ ). Максимум на этих кривых распределения отсутствует, а расчетное медианное среднее  $\bar{d}_{\Sigma}$  соответственно составляет 60 и 132 мкм [2].

Из полученных данных можно заключить, что для мелких фракций сапропеля параметр  $\bar{d}_{\Sigma}$  формулы (7) лежит за пределами изменения их размеров. Поэтому полученные значения  $\bar{d}_{\Sigma}$  не являются условными средними величинами совокупности частиц сапропеля с размерами частиц  $\bar{d} = 5-25$  мкм. Значения  $\bar{d}_{\Sigma}$  следует рассматривать в этом случае как эмпирические параметры формулы (7), не имеющие конкретного физического смысла.

Таким образом, предлагаемая зависимость (7) может быть рекомендована для описания суммарных характеристик по плюсу различных измельченных материалов преимущественно в тех случаях,



когда опытные точки располагаются на прямой линии в координатах  $\lg(2 - \lg P) - \lg d$  практически во всем диапазоне размеров фракций (от  $P = 2-3\%$  до  $P = 98-99\%$ ).

На основании формулы (7), приняв ее за базовую, обобщенную зависимость можно представить в виде

$$P = 100 \cdot K \cdot \left(\frac{d}{d_k}\right)^{n_k}, \quad (10)$$

где  $K$  – параметр, соответствующий базовому значению размеров  $d_k$  частиц полидисперсной смеси при заданном значении  $P$ , находящемся в пределах узкой группы фракций измельченного материала;  $n_k$  – параметр неоднородности этой группы фракций.

Универсальность формулы (10) можно подтвердить следующим. Если  $P_k = 36,8\%$ , то  $d_k = d_e$ . Тогда при  $d = d_e$   $K = 100/36,8 = 2,72 = e$  и формула (10) принимает вид

$$P = 100 \cdot e \cdot \left(\frac{d}{d_e}\right)^n, \quad (11)$$

т.е. является формулой, предложенной Розиным-Раммлером.

В случае  $P_k = 50\%$ , что соответствует медиане  $d_k = d_m$ , получается формула (7). При этом  $n_k = n$ . Параметры  $n$  и  $d_m$  вычисляются по формулам (5) и (8) или по методу наименьших квадратов.

В общем случае

$$d_k = d_i \sqrt[n]{\frac{\lg K}{2 - \lg P_i}}. \quad (12)$$

Параметры  $K$  формулы (10), установленные для условных значений размеров  $d_k$  узких групп фракций и соответствующих им суммарных выходов  $P_k$ , сведены в табл. 1.

Рассмотрим результаты обработки опытных данных по фракционному составу твердого сапропелевой суспензии (рис. 2). Суммарные выходы фракций по плюсу изображены в координатах  $\lg(2 - \lg P) - \lg d$  в виде двух пересекающихся прямых с разными угловыми коэффициентами  $n$ , т.е. неоднородность различных размерных групп неодинакова, причем мелкие фракции более одно-

родны по своему составу, чем крупные. Разделим фракционный состав сапропеля по размерам частиц на две зоны (рис. 2) и выполним обработку этих данных с целью получения зависимостей  $P = f(d)$  в виде (10) для каждой из этих зон. Как уже отмечалось для зоны 1 (рис. 2) с размерами частиц  $d = 5-25$  мкм параметр  $n$  для сапропеля озера Мотольское составляет 1,72 и для озера Червоное 1,92, а общие суммарные выходы  $P$  по плюсу соответственно  $68,2 \div 92,9$  и  $86,5 \div 99,2$  [2]. Пусть для зоны 1 (рис. 2) размер частиц  $d_k = 15$  мкм, т.е. располагается примерно в середине группы фракций с  $d = 5-25$  мкм. Тогда согласно табл. 1 и рис. 2 (зона 1) формула (10) для сапропелей озер Мотольское и Червоное соответственно принимает вид:

$$P = 100 \cdot 1,18^{-(d/15)^{1,72}} \quad \text{и} \quad P = 100 \cdot 1,05^{-(d/15)^{1,92}}. \quad (13)$$

Таблица 1 – Значения параметров  $K$  и  $d_k$  формулы (10) в зависимости от величины суммарного выхода по плюсу  $P_k$ , определяющего диапазон интервала размеров узкой группы фракций

$P_k, \%$	5	10	15	20	25	30	35	36,8	40	45
$d_k$	$d_5$	$d_{10}$	$d_{15}$	$d_{20}$	$d_{25}$	$d_{30}$	$d_{35}$	$d_4$	$d_{40}$	$d_{45}$
$K$	20	10	6,67	5,0	4,0	3,33	2,86	2,72	2,5	2,22
$P_k, \%$	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
$d_k$	$d_{50}$	$d_{55}$	$d_{60}$	$d_{65}$	$d_{70}$	$d_{75}$	$d_{80}$	$d_{85}$	$d_{90}$	$d_{95}$
$K$	2,0	1,82	1,67	1,54	1,43	1,33	1,25	1,18	1,11	1,05

Заметим, что частные выходы  $p$  мелких фракций сапропеля ( $d = 5-25$  мкм) не превышают в сумме для озер Мотольское и Червоное соответственно 32 и 14 %. Что же касается крупных фракций сапропеля из этих озер ( $d = 25-800$  мкм), то их суммарные характеристики  $P = f(d)$  подчиняются закономерности (7) с параметрами  $n = 0,736$  и  $d_n = 60,1$  мкм для сапропеля озера Мотольское и  $n = 0,894$  и  $d_n = 132,7$  мкм для озера Червоное [2]. В этом случае параметр  $d_n$  представляет собой медианное среднее всей совокупности частиц сапропеля, т.е. имеет конкретный физический смысл.

Что же касается параметра  $n$ , то его величина в рассматриваемом случае ( $d = 25-800$  мкм) меньше единицы. Это свидетельствует о неоднородности фракционного состава сапропеля в его суспензии и отсутствии максимума на кривых распределения частиц по фракциям.

Таким образом, в результате выполненного исследования получена зависимость (4), характеризующая кривые течения сапропелевой суспензии с учетом концентрации частиц сапропеля. Показано, что сапропелевая суспензия в состоянии покоя обладает значительно большим сцеплением с дном гидротрубопровода или отложениями в нем. В общем случае реологическое состояние сапропелевой суспензии описывается моделью Балкли-Гершеля.

Предложена обобщенная зависимость (10) для оценки суммарных выходов фракций сапропеля, выполнено толкование физической сущности параметров этой зависимости и математическое описание фракционного состава сапропелей озер Мотольское и Червоное.

#### Литература

1. Лопотко М.З. Использование сапропелей в народном хозяйстве СССР и за рубежом / М.З. Лопотко, Н.В. Кислов. – М.: ЦБНТИП Минтоппрома РСФСР, 1990. – 85 с.
2. Отчет по теме Каустобиолиты 09 «Разработка научных основ новых технологий добычи сапропелей // рук. Н.В. Кислов, № г.р. 01860016551. – Минск: ИТ АН БССР, 1989. – 148 с.
3. Кислов Н.В. Построение системы контроля процесса экскавации сапропеля / Н.В. Кислов, С.Р. Петровский, В.П. Прасолов // Гидротранспорт сапропеля. – М.: ВНИИПИ гидротрубопровод, 1987. – С. 72-76.
4. Кислов Н.В. Улавливание выбросов тонкодисперсных сред машиностроительных производств / Н.В. Кислов, П.В. Цыбуленко, В.Я. Щерба. – Гомель: ОАО «По-леспечать», 2008.
5. Березовский Н.И. Торфяные и сапропелевые месторождения / Н.И. Березовский, Б.В. Курзо, В.М. Слыш. – Минск: БНТУ, 2011. – 49 с.