

УДК 622.7

А.С. КИРНАРСКИЙ, д-р техн. наук
(Германия, Engineering Dobersek GmbH),

А.С. КРАСУЛЯ

(Украина, Комсомоильск, Полтавский ГОК),

П.И. ПИЛОВ, д-р техн. наук,

Н.А. ШВЕЦ

(Украина, Днепропетровск Национальный Горный Университет)

ОСОБЕННОСТИ СГУЩЕНИЕ ХВОСТОВОЙ ПУЛЬПЫ ПОЛТАВСКОГО ГОКА

Введение

Постоянное увеличение объема и дисперсности отходов обогащения железорудного сырья, высоты и дальности их гидротранспорта, площадей хвостохранилищ и объемов оборотного водоснабжения приводит к значительному повышению себестоимости укладки хвостов, что на фоне роста цен на электроэнергию, воду и землю, а также ужесточения требований по охране окружающей среды, вызывает сокращение прибыли предприятия. Так, суммарное потребление электроэнергии цехом хвостового хозяйства

современного железорудного ГОКа в среднем составляет 25 – 30% общего потребления электроэнергии комбината, а затраты предприятий на хвостовое хозяйство достигают 50% всех затрат на обогатительный передел.

Анализ состояния данного вопроса с ретроспективой в 40 лет показал, что при строительстве новых и реконструкции действующих обогатительных фабрик США, Канады, Японии, ЮАР и других стран всегда предусматривалась организация внутрифабричного водоснабжения, при этом максимальное использование оборотных вод достигалось путем сгущения хвостовой пульпы до 30 – 70% твердого и возврата осветленной воды в оборот для технологических нужд, в то время как обогатительные предприятия черной металлургии Украины, России, Казахстана предпочитали осветлять хвостовую пульпу в хвостохранилищах, куда перекачивались разбавленные хвосты с содержанием твердого 2 - 8%. В последние годы проводятся исследования по изысканию наиболее эффективной системы сгущения, гидротранспорта и складирования хвостовой пульпы, при этом решающую роль играет степень ее уплотнения, которая в каждом конкретном случае назначается на основании технико – экономического расчета с учетом существующей схемы добычи и

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

переработки минерального сырья, качества и реологических продуктов разделения, степени чистоты оборотной воды и расхода флокулянтов, количества пульпонасосных станций, магистральных и распределительных трубопроводов, их диаметра, рельефа местности, необходимости экранизации ложа хвостохранилища, пригодности для этой цели материала самих хвостов обогащения, уровня капитальных и эксплуатационных затрат на сгущение и перспектив настоящего производства.

Для определения условий осаждения хвостовой пульпы и установления оптимальной схемы сгущения в условиях Полтавского ГОКа были проведены исследования непосредственно на натуральных пробах отходов обогащения ОФ-1 и ОФ-2 с использованием мерных цилиндров и макетной установки, результаты которых изложены в настоящей статье.

1. Порядок проведения опытов

Эксперименты по осаждению хвостовой пульпы проводились непосредственно на обогатительной фабрике в исследовательской лаборатории ОФ №2 с отбором проб текущих отходов из хвостовых лотков с последующим их сокращением до нужного объема. Для каждой пробы определяли температуру и рН-среды, гранулометрический состав материала и содержание твердого в пульпе, после чего проводились седиментационные опыты в стеклянных градуированных цилиндрах вместимостью 1,0 л без и с использованием отечественных и импортных флокулянтов. Опыты осуществлялись в условиях свободного падения частиц при фактическом содержании твердого в хвостовой пульпе.

Ситовый анализ осуществляли вручную мокрым способом на следующем наборе сит: 0,3; 0,16; 0,071 и 0,056 мм.

В качестве флокулянтов прежде всего применяли традиционный полиакриламид ПАА типа АК – 631 (марки А – 1020 и А – 227). Из других реагентов выбор остановили на флокулянтах фирмы Ciba®: MAGNAFLOC® 336, MAGNAFLOC® 338, MAGNAFLOC® 3230, предоставленными на период испытаний специалистами указанного предприятия с соответствующими гарантиями. Концентрация рабочего раствора флокулянта составляла 0,5 и 0,025%, а расход изменялся в пределах от 1 до 75 г/т. Время естественного, т.е. без добавок реагентов, осветления пульпы составило 95 мин., в то время как продолжительность ее осветления в присутствии реагентов не превышала 3 минут при минимальном расходе – 3,0 г/т. Характер и особенности хлопьеобразования наблюдали при помощи лупы пятикратного увеличения.

После установления самого эффективного типа реагента, оптимального его расхода и концентрации переходили к сгущению хвостовой пульпы на стендовой установке (рис.1), которая являла собой макет радиального сгустителя

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

діаметром 336 мм і висотою 250 мм, виготовлений з органічного скла для забезпечення більшої наглядності седиментаційного процесу. Для видалення сливу і стисненого продукту передбачені насоси, що працюють в узгодженому режимі за витратою живлення, стисненого і освітленого продуктів. Спочатку проводився досвід без видалення ущільненої суспензії, щоб накопити необхідну постіль і досягти встановившогося режиму по сливу. Початкова хвостова пульпа заливається в верхню, живильну, ємкість, де вона перемішується і при певній витраті за допомогою розвантажувального регулювального крана направляється в стиснувальну циліндричну ємкість, розташовану нижче. В процесі істечення пульпи в неї вводиться робочий розчин флокулянта при оптимальних величинах концентрації і витрати. Після заповнення нижньої ємкості спостерігають за процесом освітлення суспензії. По досягненні висоти освітленого шару 100–150 мм здійснюється його дренажування, після чого додається початкова хвостова пульпа при відповідному введенні реагенту і досвід повторюється. Ущільнений осадок видаляють після п'яти – семи декантацій сливного продукту. Продукти розділення збираються в окремі ємкості на предмет визначення в них вмісту твердого методом випаровування.

Результати досліджень заносилися в сменний журнал опробування продуктів ОФ.

Перша серія досвідів була проведена з 11 по 14 жовтня, а друга – з 28 жовтня по 1 грудня 2005 року

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

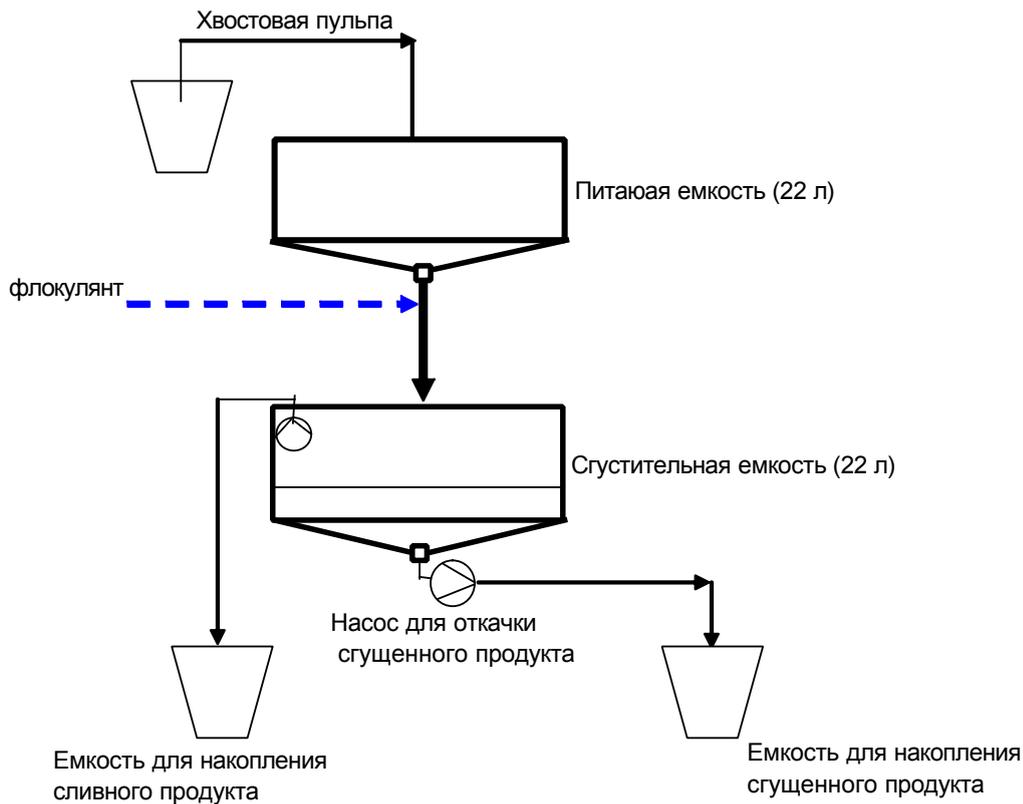


Рис.1. Стендовая экспериментальная установка для исследования сгущения хвостовой пульпы

2. Результаты исследований

На основании полученных эмпирических данных по традиционной методике Клевенджера-Коу были построены кривые осаждения и определены скорости осветления хвостовой пульпы для различных флокулянтов при различном их расходе. Температура пульпы в ходе выполнения опытов составляла в среднем 6°C . Кинетические характеристики процесса осаждения хвостовых частиц для условий Полтавского ГОКа сведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип флокулянта	Содержание твердого, %	Скорость осаждения твердых частиц хвостовой пульпы в м/с при следующих расходах флокулянта, г/т						
		3,00	6,00	12,00	24,00	36,00	50,00	75,00
Без флокулянта	2,75				0,000236			
Магнафлок М-336	2,78	0,00190	0,00310	0,00545	0,00740	0,00902	0,01017	0,01340
Магнафлок М-3230	2,67	87,58	92,39	95,67	96,81	97,38	97,68	98,24
		0,00180	0,00355	0,00800	0,01210	0,01490	0,01710	0,01710
		86,89	93,35	97,05	98,05	98,42	98,62	98,62

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

Магнафлок М-338	2,8	0,00188 87,45	0,00536 95,60	0,01110 97,87	0,01570 98,50	0,01740 98,64	0,02010 98,83	0,02460 99,04
Полиакриламід АК-63, А-1020	2,8	0,00180 86,89	0,00187 87,38	0,00467 94,95	0,00700 96,63	0,00830 97,16	0,01153 97,95	0,01300 98,18
Полиакриламід АК-63, А-227	2,8	0,00180 86,89	0,00660 96,42	0,01170 97,98	0,01210 98,05	0,01513 98,44	0,01570 98,50	0,02430 99,03

Примечание: в числителе указаны значения скорости осаждения частиц, а в знаменателе эффективность действия флокулянта

Эффективность действия флокулянтов рассчитывали по следующей формуле:

$$\eta_{\text{фл}} = (V_{\text{фл}} - V_{\text{ест}}) / V_{\text{фл}}, \text{ дол.ед.}$$

$$\eta_{\text{фл}} = ((V_{\text{фл}} - V_{\text{ест}}) / V_{\text{фл}}) \cdot 10^2, \%$$

где $\eta_{\text{фл}}$ – эффективность действия флокулянтов, дол.ед. или %; $V_{\text{ест}}$, $V_{\text{фл}}$ – скорость осветления хвостовой пульпы соответственно для условий осаждения без добавления флокулянтов и с ними, м/сек. Данные расчетов приведены в таблице 1 для каждой скорости осаждения, при этом в числителе указаны эмпирические значения скорости осветления в м/сек, а в знаменателе – расчетные величины эффективности действия флокулянтов в %.

В период проведения опробования на обогащение поступала относительно бедная железная руда K_2^2 и K_3^3 , хотя первая богаче по содержанию железом и более крупнозернистая. Ситовый анализ проводился для каждой пробы хвостов. Полученные данные позволили установить среднее содержание каждого класса крупности текущих хвостов обогащения, что отражено в табл. 2.

Таблица 2

Класс крупности, мм	Выход классов крупности, %
+0,300	00,00
0,160–0,300	2,00
0,071–0,160	12,40
0,056–0,071	4,10
0,000–0,056	81,50
Итого	100,00

Важно отметить, что расход флокулянтов оказывает значительное влияние на характер хлопьеобразования. Так, визуальные наблюдения показали, что при умеренных (3 - 12 г/т) расходах всех применяемых реагентов образуются мелкие и рыхлые флокулы неправильной формы. С возрастанием расхода до 36

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

г/т имеет место значительное укрупнение и уплотнение хлопьев, которые быстро оседают и образуют осадок с содержанием твердого 45 – 50%. Дальнейшее увеличение расхода реактивов до 50 – 70 г/т сопровождалось уплотнением флокул, приобретающих ярко выраженную шарообразную форму, при этом процесс хлопьеобразования протекал лавинообразно с установлением четкой границы раздела между слоями осветленной воды и сгущенного продукта, хотя пастообразного сгущенного продукта при этом не получили. Результаты кинетических исследований осадкообразования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Тип и расход флокулянта	Высота осадка в мерном цилиндре (мм) при расходе флокулянтов, г/т				
	0,00	6,00	12,00	36,00	50,00
Полиакриламид АК-631 марка А-1020	28,20 очень мутная вода	27,50 Очень мутная вода	24,00 грязный слив	18,00 укрупнение флокул	18,00 прозрачная вода
Полиакриламид АК-631 марка А-227	28,20 очень мутная вода	20,00 грязный слив	17,00 укрупнение флокул	16,50 Прозрачная вода	16,50 Прозрачная вода
Магнафлок-338	28,20 очень мутная вода	23,00 грязный слив	17,50 укрупнение флокул	17,00 Укрупнение флокул	17,00 Прозрачная вода
Магнафлок-3230	28,20 очень мутная вода	26,50 очень мутная вода	21,00 грязный слив	17,00 укрупнение флокул	17,00 прозрачная вода
Магнафлок-336	28,20 очень мутная вода	24,00 очень мутная вода	24,00 очень мутная вода	18,00 Укрупнение флокул	18,00 прозрачная вода

Завершающие седиментационные опыты на стендовой установке в установленном режиме позволили получить экспериментальный материал, приведенный в табл. 4. Вопреки опасениям залегания сгущенного продукта при его самотечном удалении из лабораторного сгустительного устройства не наблюдалось несмотря на то, что содержание твердого в нем превышало 50%.

Таблица 4

Показатели	Номер опыта			
	1	2	3	4
Содержание твердого в питании, %	2,6	2,5	3,2	3,2
Тип применяемого флокулянта	М-3230	М-338	М-3230	М-3230
Удельный расход флокулянта, г/т	12,00	33,70	22,60	33,70
Скорость осветления пульпы, м/сек	0,00069	0,0071	0,0062	0,00783
Содержание твердого в сгущенном продукте, %	31,00	53,40	51,97	51,60
Содержание твердого в сливе, мг/л	400,00	155,00	200,00	160,00
Расход при истечении сгущенного продукта, л/сек		0,153	0,174	0,179
Скорость осветления пульпы без применения флокулянта, м/сек	0,000185	0,00016	0,000166	0,000182

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

3. Аналіз результатів досліджень

Как видно из полученных данных, хвостовая пульпа Полтавского ГОКА отличается большой разжиженностью ($Ж:Т > 30\%$), высокой дисперсностью (81,5% класса – 56 мкм). Без применения флокулянтов скорость осветления такой разбавленной (2,3 – 2,9%) суспензии составляет 0,00016 – 0,000236 м/сек. Рассчитаем удельную площадь осаждения по следующей формуле [1]:

$$S_{уд} = (R_{исх} - R_{сг}) / (K \cdot V_{ест} \cdot \gamma_{ж}), \text{ м}^2/\text{т}\cdot\text{час}$$

где $R_{исх}$ и $R_{сг}$ – отношение $Ж:Т$ по массе соответственно в исходном и сгущенном продуктах; $V_{ест}$ – скорость осветления хвостовой пульпы без применения флокулянтов, рассчитанная по кинетическим кривым осаждения частиц, как частное от деления высоты осветленного слоя на время отстаивания, м/час; K – коэффициент, учитывающий отношение эффективно используемой поверхности осаждения сгустителя, 0,7–0,8; $\gamma_{ж}$ – плотность жидкости, т/м³.

Задаваясь экспериментально установленными данными при условии сгущения пульпы до 30%, получаем расчетное значение удельной площади осаждения на уровне 60–65 м²/т·час.

Тогда общая площадь осаждения равняется

$$S_{общ} = S_{уд} \cdot Q, \text{ м}^2$$

где Q – часовая производительность ОФ по хвостам, т/час.

Для условий ОФ-1, часовая производительность которой составляет 643 т/час, потребуются общая площадь осветления 40187,5 м² или двадцать радиальных сгустителей диаметром 50 м. Для условий ОФ-2, часовая производительность которой составляет 747 т/час, потребуются общая площадь осветления 46500 м² или двадцать четыре радиальных сгустителей диаметром 50 м.

Применение флокулянтов, эффективность действия которых превышает 85% даже при расходе 3,0 г/т, позволяет значительно сократить требуемую площадь осветления. Из исследуемых реагентов наиболее эффективными, как показывают данные табл. 1 и 3, оказались полиакриламид АК-63 марки А-227 и Магнафлок – М-338, эффективность действия которых при расходе 3,0 г/т составляет соответственно 86,89 и 87,45%, а при расходе 6,0 г/т достигает уровня соответственно – 96,42 и 95,60%. Если в первом случае показатели осветления для всех реактивов мало отличаются друг от друга и составляют в среднем 87,14%, то во втором заметно преимущества двух выделенных

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

флокулянтів. Скорость осаждения твердых частиц хвостовой пульпы в случае использования полиакриламида АК-63 марки А-227 при удельном расходе 6,0 г/т равняется 0,0066 м/с против 0,00187 м/с при подаче АК-63 марки А-1020. Скорость осветления суспензии с использованием флокулянта Магнафлок – М-338 составляет 0,00536 м/с против 0,00310 м/с для Магнафлока – М-336 и 0,00355 м/с для Магнафлока – М-3230. С точки зрения получения чистого слива (см.табл.3) наиболее эффективными оказались тоже два указанных реагента, но их расход оказался значительно выше. При удельном расходе 6,0 г/т наблюдали рыхлые флокулы и грязный слив, в то время как повышение удельного расхода до 12–36 г/т сопровождалось улучшением качества слива, в котором наблюдали только следы твердой фазы. Содержание твердого в сгущенном продукте при этом колебалось в пределах от 36,81% до 39,41%. Повышение уплотнения осадка до 50–55% влечет за собой ухудшение качества слива, хотя и на технологически безопасном уровне (не более 400–500 мг/л), но за счет резкого возрастания расхода реагентов до 33,7 г/т, что подтверждается результатами опытов на стендовой установке, представленных в таблице 4. Расход флокулянта на уровне 33,7 г/т при годовом фонде рабочего времени ОФ 8160 часов означает дополнительные годовые эксплуатационные затраты в размере 8,6 млн.гривен при стоимости флокулянта 22,5 грн./кг, в то время как удельный расход реактива в количестве 12 и 6 г/т требует соответственно ежегодно 3,06 и 1,53 млн. гривен дополнительных эксплуатационных затрат. Учитывая, что годовой объем перекачиваемой пульпы в условиях Полтавского ГОКа в настоящее время составляет 39900 м³/час (18500 м³/час по ОФ-1 и 21400 м³/час по ОФ-2) при среднем содержании твердого 3,5%, а тариф за электроэнергию равен 0,17 грн/кВт·час, получаем годовые затраты на электроэнергию 8,08 млн.грн. Следовательно, при расходе флокулянта 33,7 г/т выгоднее перекачивать хвостовую пульпу в хвостохранилище без предварительного ее сгущения, ограничивая задачу только рамками системы ОФ – ПНС. Уплотнение суспензии от 35 до 60 % при прочих равных условиях в условиях Лебединского ГОКа привело к снижению производительности сгустителя в 2 раза [1]. Следовательно, наши данные не согласуются с сложившейся тенденцией максимального сгущения хвостовой пульпы вплоть до пастообразного ее состояния [2].

Использования флокулянтов ПАА АК – 63 (марки А – 227) или Магнафлок – М-338 0,025% - концентрации при удельном расходе 12 г/т, когда при относительно чистом сливе (не более 500 мг/л) уплотнение пульпы составляет 30 – 40%, удельная площадь осветления равняется 1,109 м²/т·час. Тогда общая площадь составит для ОФ – 1 – 713,2 м², а для ОФ – 2 – 828,4 м², что потребует установки двух сгустительных устройств диаметром 30 м, а с учетом резерва и эксплуатационных преимуществ к установке могут быть рекомендованы радиальные сгустители диаметром 50 м. Дальнейшее повышение степени

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

сгущения суспензии влечет за собой резкий рост эксплуатационных затрат. Избыточный расход реагентов на уровне 50 – 70 г/т обеспечивает полное осветление пульпы при содержании твердого в сгущенном продукте более 55%, но экономически такая технология малорентабельна, а срок ее окупаемости может составить десятки лет.

Выводы

1. Устройство сгустительного отделения в условиях Полтавского ГОКа оправдывает себя по следующим соображениям:

- большой расход хвостовой пульпы (18 500 м³/час по ОФ-1 и 21 400 м³/час по ОФ-2 с перспективой возрастания этого объема по обогательному производству в ближайшие годы до 50 000 м³/час);
- значительное разжижение отходов обогащения (Ж:Т = 19–39);
- высокая дисперсность хвостов (81,5% класса менее 56 мкм).

2. Кинетические исследования осветления хвостовой пульпы непосредственно на текущих отходах обогащения позволили установить скорости осаждения частиц с применением флокулянтов и без них. В естественных условиях скорость осветления изменялась в пределах 0,00016–0,000236 м/сек. Использование флокулянтов типа ПАА и Магнафлок позволяют увеличить эту скорость при расходе 3–6 г/т на порядок, а при расходе 12–75г/т – на два порядка, что делает возможным практическую реализацию технологии сгущения.

3. Эффективность действия флокулянтов определяли по соотношению скоростей осаждения частиц с применением реагентов и без них, при этом установлено, что наиболее предпочтительными в данных условия являются полиакриламид марки АК-63 (А-227) и Магнафлок – 338.

4. Получение абсолютно чистого слива достигалось при расходе реагентов 36-50 г/т, но такой расход является экономически нерентабельным, поэтому предпочтительнее работать при умеренном расходе флокулянтов в среднем 12 г/т, что позволяет получить загрязнение слива на технологически безопасном уровне (менее 500 мг/л) при уплотнении осадка до 36–50%, свободно истекающего из зоны сгущения макетной установки стендового сгустителя.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность главному обогатителю Полтавского ГОКа Красуле Т.С. и сотрудникам лаборатории опробования за организацию и проведение седиментационных исследований непосредственно в условиях обогательного производства, а также признательны главному инженеру Полтавского ГОКа Лотоусу В.В., зам.главного инженера комбината по гидротехническим сооружениям Винтеру В.В. и начальнику шламового цеха Кошелю В.И. за внимание, поддержку и ценные советы при проведении

настоящей работы.

Список литературы

1. **Вовк Н.Е.** Обратное водоснабжение и подготовка хвостов к складированию. – М.: Недра, 1977. – 150 с.
2. **Robinsky E.I.** Thickened Tailings in the Mining Industry. – Toronto: Canada, 1999. – 210 p.

© Кирнарский А.С., Красуля А.С., Пилов П.И., Швец Н.А., 2006

Надійшла до редколегії 28.04.2006 р.

Рекомендовано до публікації

УДК 622.794

Е.Е. ГАРКОВЕНКО, канд. техн. наук
(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ОСАДКОВ ПРИ НАЛОЖЕНИИ СДВИГОВЫХ ПОЛЕЙ

В различных отраслях промышленности, в том числе и в горнодобывающей, используется обезвоживание осадков разного состава и крупности механическими методами.

В процессе обезвоживания и формирования осадка возможны несколько основных режимов их деформирования. Первый – режим компрессионного сжатия, когда в осадке развиваются (увеличиваются) только нормальные деформации сжатия, в результате чего жидкая фаза выдавливается из пор и ловушек в режиме фильтрации. Второй режим чистого сдвига, когда возможны три проявления объемной деформации: сжатия в случае сдвига в недоконсолидированном осадке, разуплотнения в случае переконсолидированного осадка и сдвиг без изменения объема в пограничном случае. Третий режим смешанный, когда возможен сдвиг со сжатием.

Любые режимы или подрежимы со сдвигом полезны, поскольку они разрушают тупиковые поры и активно перестраивают кластерную структуру осадка, что в любом случае повышает проницаемость и увеличивает скорость фильтрации жидкой фазы. Однако подрежим сдвига с разуплотнением (то есть сдвига в переконсолидированном осадке) увеличивает проницаемость больше всего [1].

Из механики грунтов известно, что испытания на сдвиг производят часто после предварительного уплотнения (консолидации) образца [2, 3]. Кроме того,