

Л.В. Закшевская, Л.М. Шипигузов

ООО «ФЛЭК»

А.В. Кудинов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ТВЕРДЫХ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ И ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ СТОЧНЫХ ВОД НА УПСВ «ПАШНЯ»

Приведены результаты исследования качественного и количественного состава твердых взвешенных частиц сточных вод УПСВ «Пашня» и их фазово-дисперсионного анализа. Выбрана технология подготовки сточных вод на УПСВ «Пашня» и проведен расчет резервуаров отстойников.

При исследовании качественного состава твердых взвешенных частиц (ТВЧ), выделенных из сточной воды УПСВ «Пашня», установлено, что в составе осадков преобладают продукты коррозии и биокоррозии, а также твердые углеводороды (табл. 1, рис. 1).

Состав осадков, выделенных из сточной воды УПСВ «Пашня», является характерным для нефтепромысловых сточных вод. Общая закономерность – преобладающее содержание в них окислов железа, продуктов коррозии и биокоррозии, что является следствием совместной транспортировки и подготовки несовместимых между собой сероводород- и железосодержащих флюидов.

В целом источниками формирования ТВЧ являются [1]:

- ◆ коррозионные процессы нефтепромыслового оборудования;
- ◆ взаимодействие между сероводородом и ионами двухвалентных металлов в присутствии растворенного кислорода, в данном случае – железа с образованием сульфидов железа;
- ◆ солюбилизующая способность деэмульгаторов, способствующая переходу органической части в воду;

Качественный состав ТВЧ, выделенных из сточной воды
УПСВ «Пашня»

Место отбора пробы	Общее содержание ТВЧ, мг/л	Состав осадков, мг/л				
		Твердые углеводороды (парафины, асфальтены и смолы)	Водорастворимые соединения	Сульфиды железа	Окислы железа, продукты коррозии и биокоррозии	Нерастворимый осадок в соляной кислоте
До РВП	14	2,00	3,00	3,22	4,78	1,00

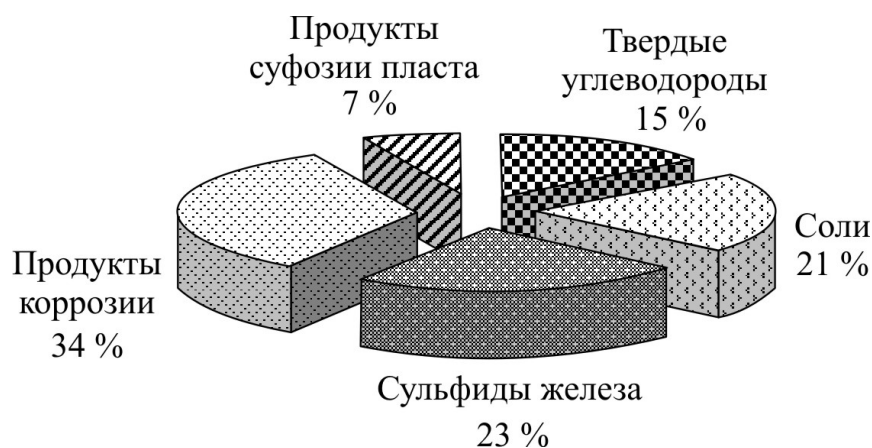


Рис. 1. Качественный состав ТВЧ, выделенных из сточной воды УПСВ «Пашня»

- ◆ микробиологическая зараженность нефтяных месторождений, запускающая механизм интенсивного осадкообразования, связанного, в основном, с образованием биогенного сероводорода;
- ◆ естественные процессы высаливания в минерализованной воде при изменении термобарических условий;
- ◆ продукты суффозии пласта.

Количественный и фазово-дисперсионный анализ примесей, выделенных из сточных вод УПСВ «Пашня» (табл. 2, на рис. 2), показал, что ТВЧ, содержащиеся в сточной воде, составляют полидисперсную агрегативно-неустойчивую систему с размерами частиц от 11,7 до 0,038 мкм, которые в процессе осаждения агломерируются, изменяют свою форму, плотность и размеры, вследствие этого изменяется и скорость их осаждения.

Характерным свойством дисперсных систем, особенно если они разбавлены, является склонность к оседанию (седиментация) или всплыванию частиц дисперсной фазы (обратная седиментация). Скорость оседания твердых частиц зависит как от размеров частиц, так и от природы

Таблица 2

Основные результаты фазово-дисперсионного анализа примесей,
выделенных из сточных вод УПСВ «Пашня»

Вид показателей	Показатель	Значение
Общие	Обработано изображений	1
	Полная рабочая площадь	412566,171 мкм ²
	Общее количество объектов	195
О классах	Количество классов	9
	Классифицированных объектов	195
	Площадь классифицированных объектов	1907,12662 мкм ²
	Максимум (сред. габарит)	11,6838178
	Минимум (сред. габарит)	0,038
	Среднеарифметическое (сред. габарит)	2,83052412

*Таблица классификации*

Класс	Кол-во объектов	Распределение по кол-ву, %	Масса, %
1	85	43,59	0,74
2	27	13,85	2,66
3	24	12,31	7,72
4	21	10,77	12,32
5	12	6,15	13,89
6	12	6,15	18,63
7	4	2,05	9,13
8	5	2,56	14,28
9	5	2,56	20,64

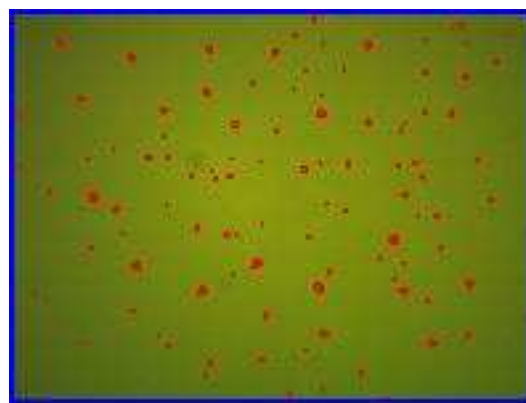
Обработанное изображение

Рис. 2. Фазово-дисперсионный состав ТВЧ

фаз (вязкости и плотности дисперсной среды, а также плотности дисперсной фазы). Скорость оседания частиц твердой фазы в первую очередь определяется размерами ее частиц. Выполненные исследования показали высокую дисперсность ТВЧ, выделенных из сточной воды УПСВ «Пашня», – среднемедианный размер частиц составляет 2,83 мкм.

Высокая дисперсность ТВЧ устанавливает вполне закономерные ограничения на процесс осаждения примесей методом гравитационного отстаивания и разделения в гидроциклонах.

По итогам количественного определения примесей и их фазово-дисперсионного состава можно констатировать, что в процессе подготовки воды в РВП произойдет выделение порядка 30 % ТВЧ (без учета их дополнительного образования в результате нестабильности воды) и 80 % пленочной нефти.

В процессе осаждения примесей в сточной воде на выходе из РВП останется порядка 8 мг/л ТВЧ, что удовлетворяет требованиям стандарта, и 15–40 мг/л нефти, что несколько превышает допустимые величины.

Осаждение взвешенных частиц происходит под действием силы тяжести. Конструкции отстойников, применяемые для осветления воды, являются проточными, так как осаждение взвеси в них происходит при непрерывном движении воды от входа к выходу. Поэтому скорости движения воды в отстойниках должны быть малы: в горизонтальных, тонкослойных и радиальных отстойниках – несколько миллиметров в секунду, в вертикальных – десятые доли. При таких малых скоростях поток почти полностью теряет свою так называемую транспортирующую способность, обусловленную интенсивным турбулентным перемешиванием. Осаждение взвеси в потоке, движущемся с весьма малой скоростью, почти полностью лишенном транспортирующей способности, подчиняется, по В.Т. Турчиновичу [2], с известным приближением законам осаждения в неподвижном объеме жидкости. Эти законы хорошо изучены применительно к явлению осаждения зернистой агрегативно-устойчивой взвеси, частицы которой в процессе осаждения не слипаются друг с другом, не изменяют своих форм и размеров. Осаждение неустойчивой взвеси, способной агломерироваться, слипаться в процессе осаждения, изучено в меньшей степени.

Оба явления имеют практическое значение для отстойников, применяемых в технологии очистки воды. Первое – для отстойников, используемых при осветлении мутных вод в качестве первой ступени процесса очистки воды, или для грубого осветления воды при водоснабжении промышленных предприятий. Второе – для отстойников, в которых происходит осаждение коагулированной взвеси.

Седиментация зернистой взвеси подчиняется более простым закономерностям, чем неустойчивой взвеси, но эти же закономерности с определенными допущениями применяют для расчета осаждения

и неустойчивой взвеси. Поэтому прежде рассмотрим осаждение зернистой взвеси, которое описывается линейным законом Стокса:

$$F_c = 3\pi\eta u d,$$

где F_c – сила сопротивления; η – вязкость жидкости; u – скорость осаждения частицы; d – диаметр частицы.

Этот закон определяет величину силы сопротивления, которую испытывает частица при своем падении в жидкости. Сила сопротивления изменяется пропорционально скорости. Закон Стокса, как показывает опыт, справедлив для частиц очень малого размера, осаждающихся с малой скоростью (ламинарный режим), когда на сопротивление движению оказывают влияние только силы вязкости. С увеличением размера и скорости осаждения частиц линейный закон нарушается. Это вызывается возникновением турбулентности при обтекании движущейся частицы жидкостью, когда помимо вязкости на движение частицы начинают оказывать влияние инерционные силы.

В более общем виде закон сопротивления при падении частицы в жидкости может быть представлен в форме, предложенной Ньютоном–Рэллем:

$$F_c = \psi \rho l u^2 d^2,$$

где ψ – коэффициент сопротивления; ρ – плотность жидкости; d – диаметр частицы, определенный как диаметр равновеликого по объему шара.

Коэффициент сопротивления ψ зависит от числа Рейнольдса:

$$Re_c = \rho l u d / \eta.$$

При рассмотрении осаждения частиц в жидкости исходим из допущения, что их движение равномерное, что подтверждается экспериментально. Следовательно, силы, действующие на частицу, уравновешены. Этими силами являются сила тяжести, равная массе частицы в жидкости, и сила сопротивления. В самом начале движение ускоренное, а с увеличением скорости осаждения растет сила сопротивления и очень скоро наступает момент, когда силы, действующие на частицу, уравновешиваются. Сила тяжести G (или масса частицы в жидкости m) рассчитывается по формуле

$$G = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_2 - \rho_1) g,$$

где ρ_2 – плотность частицы; g – ускорение свободного падения.

Приравнявая силу сопротивления по формуле к силе тяжести по формуле, получим

$$\frac{\pi d^3}{6}(\rho_2 - \rho_1)g = \psi \rho_1 u^2 d^2,$$

откуда

$$\psi = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1} g \frac{\pi d}{6u^2}.$$

По формуле вычисляют значения коэффициента сопротивления при осаждении частиц.

Зависимость $\psi_c = f(\text{Re}_c)$ устанавливается опытным путем. Обширные экспериментальные данные по седиментации зерен песка и гравия в воде были собраны и обобщены А.П. Зегжда. Обобщение экспериментального материала о сопротивлении шаров сделано Л.И. Седовым, Д.М. Минцем [2].

На рис. 3 приведены кривые зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса, построенные по экспериментальным данным. Кривые даны в логарифмической анаморфозе. Как видно из приведенных графиков, экспериментальные кривые охватывают широкую область изменения чисел Рейнольдса, а следовательно, размеров частиц и скоростей их осаждения.

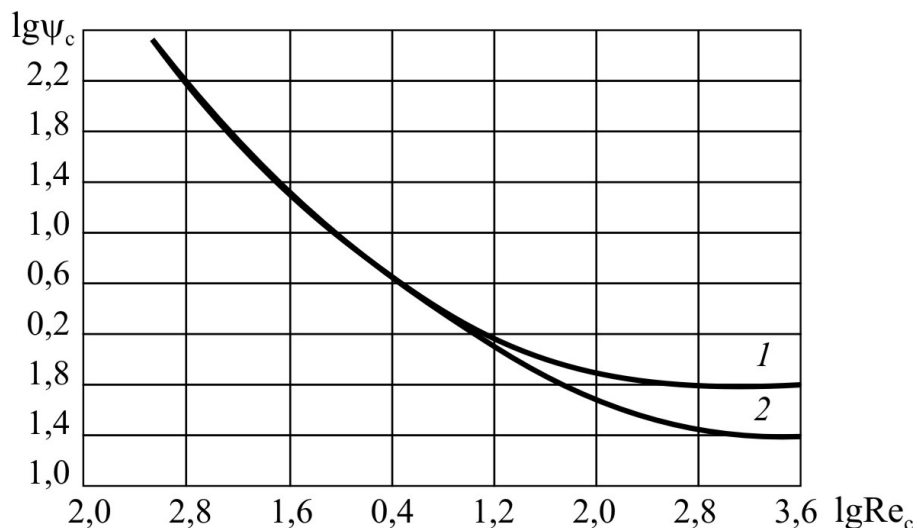


Рис. 3. Зависимость $\lg\psi_c = f(\lg\text{Re}_c)$ для свободно падающих в воде частиц: 1 – для песка и гравия (по А.П. Зегжда); 2 – для шаров (по Л.И. Седову)

При малых значениях Re_c (область малых частиц и малых скоростей) зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса выражается прямой, направленной под углом 45° к осям ординат и описываемой уравнением

$$\lg \psi = -\lg Re_c + \lg A,$$

где $\lg A$ – ордината прямой при $\lg Re_c = 0$. Тогда $\psi = A/Re_c$.

Подставляя сюда значение Re_c и ψ , получим для силы сопротивления падению зерна

$$F_c = A \eta u d,$$

т.е. закон Стокса, где $A = 3\pi$.

Подставляя значение A , получим

$$\psi = \frac{3\pi}{Re_c}.$$

С увеличением размера и скорости осаждения частиц, т.е. с увеличением числа Re_c , линейный закон нарушается. Граница применимости линейного закона определяется критическим значением числа Рейнольдса, равным 1. При больших значениях Re_c кривая коэффициента сопротивления плавно переходит в прямую линию, параллельную оси абсцисс. Это зона турбулентной автомодельности, в которой коэффициент сопротивления не зависит от числа Рейнольдса и сохраняет постоянное значение, однако неодинаковое для частиц различной формы и шероховатости их поверхности. Коэффициент сопротивления возрастает для шероховатых частиц неправильной формы. По найденной зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для частиц определенного вида можно найти скорость их осаждения из выражения

$$u = \left(\frac{\pi d}{6\psi} g \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1} \right)^{0,5}.$$

Коэффициент сопротивления определяют по экспериментальным графикам:

$$\psi_c = f(Re_c).$$

В области действия линейного закона сопротивления после подстановки значения $\psi_c = 3\pi/Re_c$ в формулу и преобразований получим

$$u = \frac{d^2 (\rho_2 - \rho_1)}{18\eta} g.$$

Формулу обычно называют формулой Стокса. Она применима для вычислений скорости осаждения частиц малого размера при значении числа $Re_c < 1$.

Для частиц ТВЧ ($\rho_2 = 2,83$) при температуре воды $t = 10$ °С ($\eta = 0,0131$) критическое значение числа Рейнольдса соответствует размеру частиц $d = 1$ мкм и скорости осаждения $u = 0,0073$ см/с; $d = 2$ мкм, $u = 0,29$ см/с.

В табл. 3 приведен гидравлический расчет изменения скорости потока в резервуарах при разной производительности водоочистных сооружений (расчет выполнен по аналогии с расчетом для металлических труб с условным диаметром, соответствующим геометрическим размерам резервуаров).

Как показывают расчеты, во всех случаях скорость потока воды в резервуаре остается ниже критической и не приведет к возникновению ее транспортирующей способности.

Иными словами, для осаждения частицы, находящейся на высоте 900 см крупностью 1 мкм в вертикальном резервуаре РВС-3000 при высоте взлива 9 м, потребуется 34,2 ч, или 1,4 сут, а в РВС-5000 при высоте взлива 12 м – 45,6 ч, или 1,9 сут.

Для осаждения частицы, находящейся на высоте 900 см крупностью 2 мкм в вертикальном резервуаре РВС-3000 при высоте взлива 9 м, потребуется менее 1 ч, в вертикальном резервуаре РВС-5000 при высоте взлива 12 м – чуть более 1 ч.

Расчетное время отстаивания воды при двух работающих резервуарах РВС-3000 и производительности установки, равной 10 000 м³/сут, составляет 14,8 ч. При снижении производительности до 8000 м³/сут – 18,5 ч (в соответствии с балансом добычи воды на УПСВ «Пашня» (табл. 3).

Расчетное время отстаивания воды при двух работающих резервуарах РВС-5000 и производительности установки, равной 10 000 м³/сут, составляет 24 ч. При снижении производительности до 8000 м³/сут – 30 ч.

Учитывая результаты фазово-дисперсионного состава, можно рассчитать, что при 14-часовом отстаивании будет удалено 98 % примесей или, в абсолютном выражении, 13,7 мг/л ТВЧ. Речь, опять-таки, не идет о примесях, образующихся в результате нестабильности воды непосредственно в водоочистных сооружениях.

Таблица 3

Гидравлический расчет металлических трубопроводов

$$V = Q/W = 4q/\pi D_p^2,$$

где V – скорость движения жидкости, м/с; Q – расход жидкости, м³/с, л/с; W – площадь потока, живое сечение, м²; q – расход жидкости, м³/с, л/с; $D_p = D_n - S$; D_p – расчетный диаметр трубы, мм, м; D_n – наружный диаметр трубопровода, мм, м; S – толщина стенки трубы, мм, м.

$q, \text{ м}^3/\text{с}$	$4q$	D_p	D_p^2	πD_p^2	V	$D_p = D_n - S =$	20920	12	20896
0,1157	0,4628	20,895	436,601	1371,621	0,00034	$D_p = D_p - 1 =$			20895
PBC-5000. Подача 10000 м ³ /сут = 416 м ³ /ч = 0,1157 м ³ /с									
$q, \text{ м}^3/\text{с}$	$4q$	D_p	D_p^2	πD_p^2	V	$D_p = D_n - S =$	20920	12	20896
0,0926	0,3704	20,895	436,601	1371,621	0,00027	$D_p = D_p - 1 =$			20895
PBC-5000. Подача 8000 м ³ /сут = 333 м ³ /ч = 0,0926 м ³ /с									
$q, \text{ м}^3/\text{с}$	$4q$	D_p	D_p^2	πD_p^2	V	$D_p = D_n - S =$	18980	12	18956
0,0926	0,3704	18,955	359,292	1128,748	0,00033	$D_p = D_p - 1 =$			18955
PBC-3000. Подача 8000 м ³ /сут = 333 м ³ /ч = 0,0926 м ³ /с									
$q, \text{ м}^3/\text{с}$	$4q$	D_p	D_p^2	πD_p^2	V	$D_p = D_n - S =$	18980	12	18956
0,1157	0,4628	18,955	359,292	1128,748	0,00041	$D_p = D_p - 1 =$			18955
PBC-3000. Подача 10000 м ³ /сут = 416 м ³ /ч = 0,1157 м ³ /с									

Таким образом, теоретические расчеты показывают, что на сегодняшний момент гравитационное отстаивание сточной воды на УПСВ «Пашня» может обеспечить регламентируемое качество воды по содержанию ТВЧ при использовании вертикальных резервуаров PBC-3000.

Расчет скорости восходящего потока воды в резервуарах водоподготовки произведен при их последовательной работе. При параллельном включении резервуаров (как требует ВНТП 3-85) скорость потока снизится вдвое, следовательно, время осаждения ТВЧ сократится, т.е. два РВП-3000 обеспечат регламентируемое качество воды по показателю ТВЧ при любой схеме подключения.

Что касается вопросов выделения нефти, то кинетику процесса ее осаждения или всплывания можно установить опытным путем и только для конкретной ситуации: тип и количество всех химических реагентов, поступающих в систему нефтесбора и подготовки нефти, должны быть постоянными. При изменении ассортимента реагентов или их концентрации происходит изменение величины поверхностного натяжения воды и нефти, что влечет за собой изменение дисперсности нефтяных глобул и их седиментационных характеристик.

Есть и обратный путь развития событий: регулируя тип применяемого реагента, можно повлиять на величину поверхностного натя-

жения и, таким образом, на количество примесей в подтоварной воде. Это относится к области превентивных мероприятий, что является очень актуальным для условий УПСВ «Пашня».

Если проблему удаления ТВЧ из сточных вод можно решить методами гравитационного отстаивания, то снижения концентрации нефти можно добиться за счет превентивных мероприятий.

Список литературы

1. Гиматудинов Ш.К. Физика нефтяного и газового пласта. – М.: Недра, 1982. – 311 с.

2. Тронов В.П., Тронов А.В. Очистка вод различных типов для использования в системе ППД. – Казань: ФЭН, 2001. – 560 с.

Получено 20.06.2012