

ка, имевших место в сальниковых уплотнениях компрессоров.

Немаловажным техническим решением является применение растворимого с аммиаком масла. Отсутствие системы отделения и возврата масла позволяет значительно снизить массогабаритные характеристики, а также свести к минимуму емкостное оборудование.

При исследовании применяемых технических решений рассматриваются две независимые задачи: определяется оптимальное значение объема заправки для каждого из заданных температурных режимов, а также определяется допустимый диапазон рабочих температур для одного объема заправки. Оба экспериментальных исследования проводятся за счет ручного изменения объема заправки при помощи манежового ресивера.

При решении первой задачи определяется поле оптимальных значений доз заправки для исследуемого диапазона рабочих температур. Данные значения позволяют корректировать манежовый ресивер холодильной машины для известного диапазона рабочих температур. При решении второй задачи объем заправки рассчитывается для работы в спецификационном режиме исходя из требований потребителя холода и климатических условий. Затем изменяются значение температуры хладоносителя на выходе из испарителя, а также значение температуры теплоносителя для охлаждения конденсатора, в данном случае воздуха. Таким образом, определяется рабочий диапазон для неизменного объема заправки, ограниченный требованиями энергоэффективности и безопасности работы. Проведение данного эксперимента позволит также изучить работу испарителя при «заливе» или недостаточном питании жидким аммиаком. Поскольку пластинчатые испарители могут быть образованы из гофр различного профиля, соотношения объема каналов и теплопередающей поверхности также могут быть различны. При достаточной емкости испарителя возможен отказ и от корректировки дозированной заправки из манежового ресивера.

Реализация двух систем питания испарителя позволит провести эксперимент с целью сранения энергоэффективности безресиверной схемы с «традиционной» при поступлении жидкого аммиака из линейного ресивера через ТРВ.

Результатом примененных технических решений является значительное сокращение емкостного оборудования, энергозатрат на производство холода, аммиакоемкости системы, её стоимости и повышения безопасности. Процесс производства и потребления холода осуществляется в безнадзорном автоматическом режиме.

Таким образом, современный уровень развития холодильной техники позволяет создавать малоаммиакоемкие чиллеры, отвечающие всем тенденциям экологической безопасности, а также способные конкурировать с фреоновыми аналогами.

Изучение изменения свойств осадков городских сточных вод на площадках естественной сушки

К.т.н. доц. Веригина Е.Л
Университет машиностроения
84992671970
verigina.61@mail.ru

Аннотация: Площадки естественной сушки являются самым распространенным в России сооружением обработки осадков сточных вод. Процесс обезвоживания осадков на иловых площадках включает 3 этапа удаления воды из осадка: гравитационное уплотнение, фильтрация и сушка. Проведены исследования изменения физико-химических свойств сброженного осадка городских сточных вод в процессе естественной сушки и вымораживания на иловых площадках. Установлено, что лучшими водоотдающими свойствами обладает осадок, замороженный при небольших отрицательных температурах, характеризующихся низкими скоростями движения фронта льда.

Ключевые слова: площадки естественной сушки, физико-химические свойства, осадок городских сточных вод.

В процессе обработки сточной воды на городских станциях очистки образуются вторичные отходы – осадки городских сточных вод. Количество и качественный состав осадков зависят как от качественных показателей обрабатываемых сточных вод, так и от используемых методов обработки.

Осадок, образовавшийся в процессе очистки городских сточных вод, прошедший обработку в метантенках, является слабоструктурированной биокolloидной дисперсной системой с высоким содержанием воды. Влажность осадка в среднем составляет 97%. Микроскопирование образцов сброженного осадка, проведенное в институте общей физики РАН на растровом электронном микроскопе, показало, что средний размер частиц твердой фазы составляет 3 мкм, основное количество частиц имеет диаметр от 1 до 5 мкм. Форма частиц приближается к сферической, фактор формы равен 0,62. Электрокинетический потенциал осадка составляет – 30 мВ. Осадок влажностью 97,4% имеет статическое напряжение сдвига равное 0,4 Па. Удельное сопротивление фильтрации осадка (УСФ) составляет $(2700 \pm 1200) \cdot 10^{10}$ см/г.

Стратегия последующей утилизации осадков сточных вод во многом определяет выбор технологической схемы, методов и сооружений очистки сточных вод. В России наибольшее распространение получили иловые площадки на естественном основании каскадного типа с отстаиванием и поверхностным удалением воды. Рабочая глубина карт составляет 2,5 метра. Число карт в каскаде на различных площадках варьирует от 4 до 17. Осадок в зависимости от числа карт в каскаде должен подаваться на верхние карты. Твердая фаза, отстаивающаяся из осадка, остается на картах, жидкая фаза перепускается к концу каскада транзитом через все карты и подвергается окончательному осветлению на так называемых водяных картах. Цикл: налив высотой около 60 см – отстаивание – удаление надильовой воды – налив – должен повторяться до полного заполнения карты.

Направленный на площадки естественной сушки осадок последовательно проходит следующие стадии обработки: уплотнение, подсушивание и замораживание-оттаивание, с последующим удалением выделившейся воды. В процессе пребывания осадка на площадках меняются его физико-химические свойства.

Проведены исследования изменения физико-химических свойств сброженного осадка городских сточных вод в процессе естественной сушки и вымораживания на иловых площадках.

Для оценки изменения водоотдающих свойств осадка определялись удельное сопротивление фильтрации и время капиллярного всасывания.

Определение содержания различных форм воды в осадке осуществлялось методами изотермической и неизотермической термогравиметрии. Термогравиметрический анализ образцов осадка проводился методом неизотермической термогравиметрии на дериватографе Q-1500D (система Паулик-Паулик, Эрдеи-Венгрия). Сушка осадка в изотермических условиях осуществлялась на термовесах GIBERTINI EVROTHERM, обеспечивающих постоянную температуру сушки образца большой массы (до 200 г) и непрерывную регистрацию его веса. Кривые потери веса образца во времени обрабатывались на ЭВМ с целью определения влажности осадка в первой критической точке.

Исследование структурно-механических свойств осадка влажностью более 91% проводилось на ротационном вискозиметре с коаксиальными цилиндрами (ФЕВ MLV Prufgerate Werk, Medingen, Dresden). Для измерения динамического предельного напряжения сдвига осадка влажностью менее 91% был использован модифицированный тиксотрометр сдвига Вейлера-Ребиндера. Осадки ГСВ с влажностью менее 91% являются нетекучими, для измерения их предельного динамического напряжения сдвига была изготовлена специальная разъемная кювета. Перед измерением каждая из половинок кюветы плотно заполняется ис-

следуемым осадком таким образом, чтобы рифленая лопатка (индентор), помещенная между ними, оказалась плотно обжата исследуемым образцом для того, чтобы избежать образования пустот в объеме образца и в особенности на границе индентор-осадок.

Эксперименты по определению зависимости интенсивности сушки от метеорологических параметров проводились в промышленных климатических камерах Feutron-3524/58.

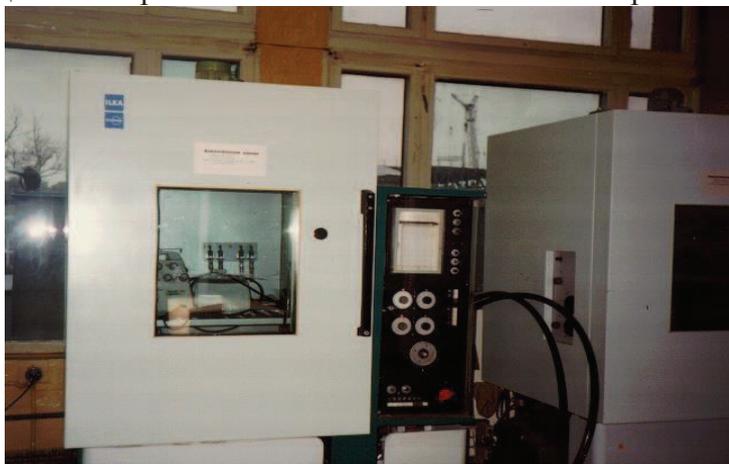


Рисунок 1

В опытах использовался уплотненный, сброженный осадок. Анаэробно стабилизированный осадок подвергался уплотнению на лабораторном стенде.

Проведенные исследования позволили верифицировать коэффициенты K_1 и K_2 , уравнение сушки осадка сточных вод в естественных условиях получило следующий вид:

$$\frac{dH}{dt} = 0,12 \cdot (1 + 0,69V_2) \cdot \Delta L, \quad (1)$$

где V_2 – скорость ветра на высоте 2 м от поверхности осадка, ΔL – дефицит влажности.

В процессах уплотнения и сушки осадка происходит изменение его структурно-механических свойств. Результаты исследований изменения этих свойств представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Результаты определений, полученных на тиксотрометре сдвига

Влажность, W%	Динамическое напряжение сдвига τ	
	Па	кг/м ²
59,0	48892,00	4984,0
68,7	21002,38	2143,1
73,0	12242,90	1248,0
76,0	6686,54	682,3
79,0	3920,00	400,8
84,0	1445,50	147,5
91,0	111,80	11,4

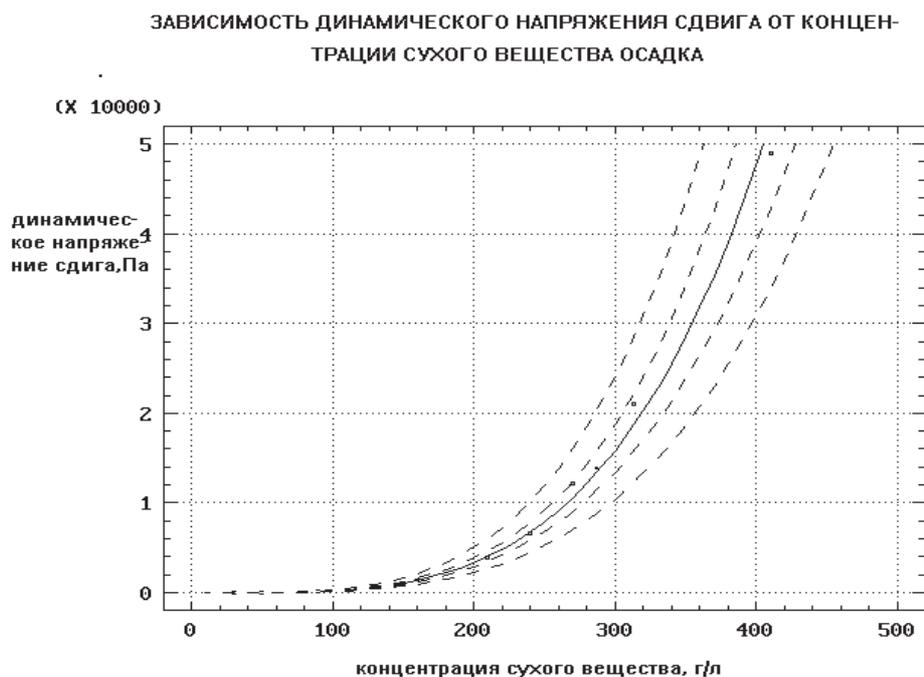
Таблица 2

Результаты определений, полученных на Rheotest 2.1

Влажность, W%	Напряжение сдвига τ , Па, (Rhotest. 2.1)	
	Статическое	Динамическое
91,0	55,0	112,0
95,0	4,0	18,0
95,0	2,5	15,8
95,0	3,3	17,6
97,4	0,4	2,7

Результаты исследований, показали, что осадки ГСВ являются неньютоновскими структурированными жидкостями, имеющими широкий диапазон пластической прочности структуры и эффективной вязкости, с нелинейной зависимостью τ от ε , такие системы относятся к псевдопластическим твердообразным телам.

Надежность полученных экспериментальных данных подтверждает практически полное совпадение величины $\tau_{\text{дин}}$, полученное двумя независимыми методами (на Rheotest 2.1 и на тиксотрометре сдвига) для одного и того же осадка влажностью 91%. Проведенные опыты позволили получить графическую зависимость динамического напряжения сдвига ($\tau_{\text{дин}}$) от влажности осадка (рисунок 2).



Анализ кривой показывает, что уменьшение влажности осадка в процессе обезвоживания на иловой площадке приводит к резкому увеличению динамического предельного напряжения сдвига. Изменение влажности в диапазоне от 95 до 59% сопровождается ростом прочности структуры более чем на три порядка, а в диапазоне от 97 до 59% – более чем на четыре порядка. Зависимость между концентрацией сухого вещества осадка и динамическим напряжением сдвига можно выразить следующей формулой:

$$\tau_{\text{дин}} = 6 \cdot 10^{-6} \cdot C^{3,815}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{дин}}$ – динамическое напряжение сдвига, Па;

C – концентрация сухого вещества, г/л.

Осадки ГСВ имеют ярко выраженную критическую концентрацию твердой фазы, выше которой начинается резкое увеличение пластической прочности структуры осадка. Критическая концентрация $C_{\text{кр}} = 22 - 23\%$ ($W = 78 - 77\%$). Исследование реологических свойств осадка позволило определить значения предельной влажности уплотненного осадка для самотечного течения – 87% и для буртования – 78%.

Для иловых площадок, расположенных в средней полосе и на севере России, важным технологическим приемом, оказывающим существенное влияние на интенсивность обезвоживания осадка, является замораживание. Проведение замораживания осадка с последующим отведением талой воды в весенний период позволяет получить осадок влажностью 83 – 6%. Для оптимального проведения процесса замораживания необходимо соответствие высоты слоя налива осадка глубине промерзания при данной температуре воздуха. Опыт

натурных наблюдений за площадками, залитыми осадком на глубину более 1 м, показал, что даже при многолетнем цикле замораживания-оттаивания изменение структуры осадка происходит только в верхнем слое. При высоте налива, превышающей глубину промерзания, под слоем замерзшего осадка сохраняется незамерзший сброженный осадок с плохими водоотдающими свойствами.

При проведении экспериментов учитывались специфические особенности замораживания на иловых площадках. Емкости с осадком, изготовленные из прозрачного пластика, погружались в слой теплоизолятора. Излучение тепла происходило только с верхней горизонтальной поверхности емкостей, что исключало их промерзание снизу и с боков. Фронт движения льда при этом располагался горизонтально и двигался в направлении сверху вниз. Оттаивание производилось в том же теплоизолирующем контейнере, для сохранения кинетики размораживания, характерной для природных условий. Влажность исходного осадка изменялась в диапазоне от 94 до 97%.

Получена квадратичная зависимость глубины промерзания сброженного осадка от времени и температуры замораживания, эмпирический коэффициент k равен 0,018, что в 2 раза меньше константы замораживания воды.

$$H_{np} = k \cdot \sqrt{S}, \quad (3)$$

где h – толщина слоя промерзшего осадка, см; k – эмпирический коэффициент; S – продолжительность замораживания при данной температуре, сут·°C.

Влияние замораживания на свойства сброженного осадка производилось следующим образом. Уплотненный осадок средней влажностью 94% помещался в специальный контейнер и подвергался замораживанию в морозильной камере. Скорость движения фронта льда в сериях экспериментов поддерживалась равной 10, 20 и 30 мм/сут. Оттаивание производилось в том же теплоизолирующем контейнере, для сохранения кинетики размораживания, характерной для природных условий. После оттаивания осадок передавался для последующего изучения его водоотдающих свойств.

Влияние скорости замораживания на УСФ по средним данным, полученным в экспериментах, представлено в таблице 3.

Таблица 3

Скорость замораживания, мм/час	Удельное сопротивление фильтрации, см/г·10 ⁻¹⁰	
	исходного осадка	оттаявшего осадка
1	2700 ± 1200	2,7
2		3,6
3		4,8

Данные, представленные в таблице 3, показывают, что операция замораживания с последующим оттаиванием осадка позволяет снизить удельное сопротивление фильтрации (УСФ) на два порядка. Более низкие значения УСФ достигаются при использовании медленного замораживания.

Количество выделяемой в этом процессе воды было определено в опытах по фильтрации под действием силы тяжести. Проведенные эксперименты позволили установить общий вид кривой изменения количества фильтрата при обезвоживании под действием силы тяжести. Экспериментальные кривые описываются дробно-линейной функцией:

$$V_{\Phi} = V_{\Phi}^{\max} \cdot \frac{t}{t_n + t}, \quad (4)$$

где V_{Φ} – объем выделяемого фильтрата, t – время свободного стекания поровой воды под действием силы тяжести, V_{Φ}^{\max} – максимальный объем выделившегося фильтрата, t_n – время соответствующее выделению половины V_{Φ}^{\max} . Дифференцирование полученной функции и приведение выделяющегося объема воды к площади фильтрации позволило определить

уравнение интенсивности фильтрации:

$$i = \frac{V_{\phi}^{\max} \cdot (t_n - t \cdot t_n + t)}{F \cdot (t_n + t)^2 \cdot 10^3} \quad (5)$$

Верифицированные коэффициенты уравнения 5 для различных скоростей замораживания (по усредненным результатам опытов) представлены в таблице 4.

Таблица 4

Влияние скорости замораживания на значения коэффициентов уравнения

Скорость замораживания, мм/час	Значения коэффициентов уравнения			
	исходного осадка		оттаявшего осадка	
	V_{ϕ}^{\max} мл	t_n , мин	V_{ϕ}^{\max} мл	t_n , мин
1	61	123	110	0,8
2			106	2,0
3			100	2,4

Анализ данных таблицы показывает, что замораживание увеличивает вдвое максимальный объем фильтрата и на два порядка снижает продолжительность обезвоживания осадка при гравитационном разделении.

Зависимость количества выделившейся воды при свободном стекании от скорости замораживания.

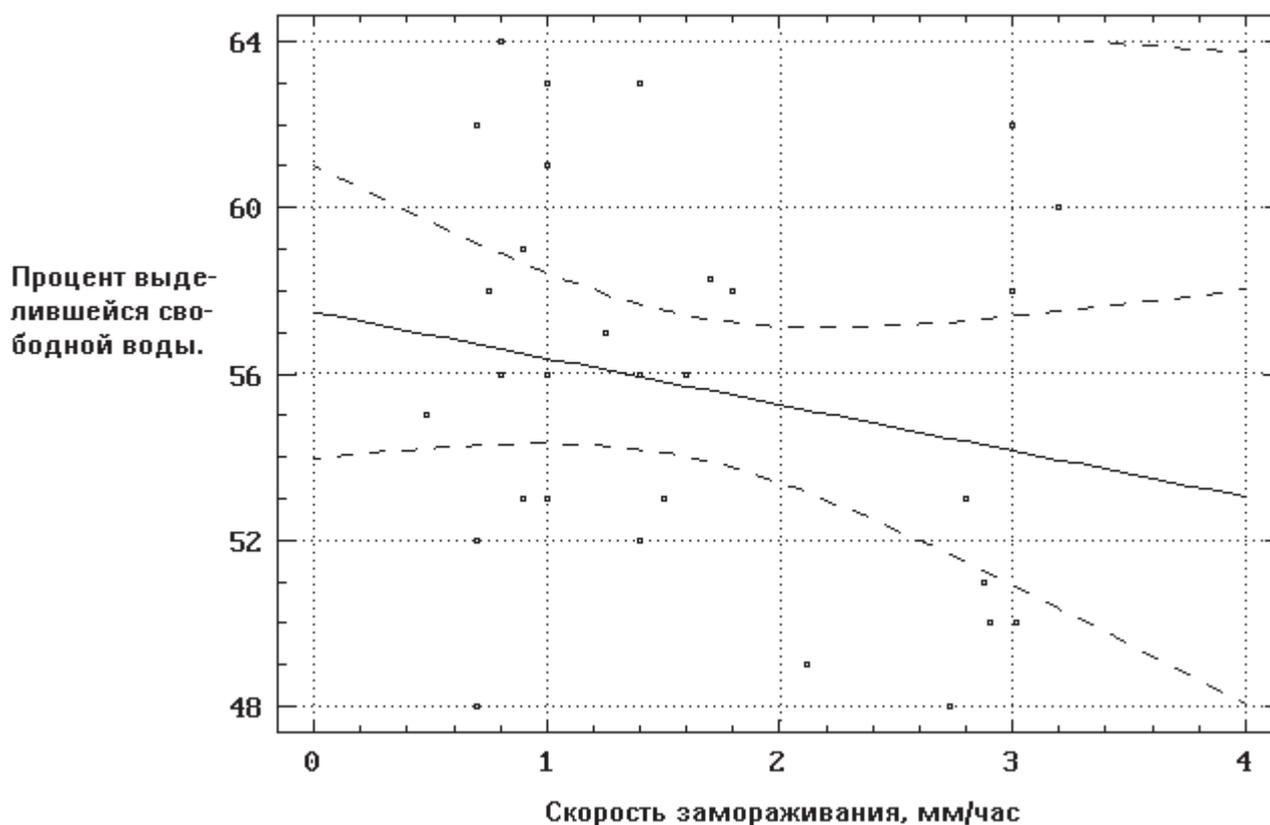


Рисунок 3

Вторым фактором, влияющим на количество отделяющейся воды, является время выдерживания осадка при пониженной температуре. Проведенные исследования показали, что такое влияние практически отсутствует.

Типичная кривая изменения высоты подъема поровой воды осадка в зависимости от времени капиллярного всасывания представлена на рисунке 4.

Зависимость высоты подъема поровой воды осадка по капиллярам от времени капиллярного всасывания
(скорость замораживания 1 мм/ч)

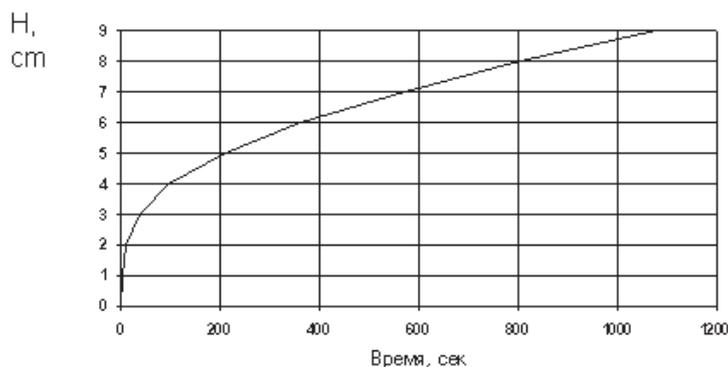


Рисунок 4

Средние скорости капиллярного всасывания на участке фильтровальной ленты длиной 60 мм представлены в таблице 5. Тенденция, полученная методами, описанными выше, полностью подтверждается при анализе скорости капиллярного всасывания (СКВ).

Таблица 5

Влияние скорости замораживания на скорость капиллярного всасывания

Скорость замораживания, мм/час	Скорость капиллярного всасывания, см/час	
	исходного осадка	оттаявшего осадка
1	23	115
2		76
3		31

СКВ максимальна при замораживании со скоростью 1 мм/час и минимальна для исходного осадка.

Результаты исследований образцов методом неизотермической термогравиметрии, проведенные на дериватографе «Q-1500D» (система Паулик-Паулик), показали, что вода, присутствующая в осадках ГСВ, имеет столь малую энергию связи с частицами осадка, что делает малочувствительным используемое оборудование.

Проведение опытов по изучению форм связи с помощью изотермической термогравиметрии позволило построить кинетические кривые испарения для осадка, замороженного при разных скоростях движения фронта льда.

Изменение влажности осадка в первой критической точке кривых изотермической сушки на термовесах GIBERTINI EVROTHERM представлено в таблице 6.

Таблица 6

Влияние скорости замораживания на влажность в первой критической точке

Скорость замораживания, мм/час	Влажность в первой критической точке, %	
	исходного осадка	оттаявшего осадка
1	90	72
2		75
3		88

Влажность осадка в первой критической точке (точке перелома) соответствует количеству воды, находящейся в несвободном состоянии. Снижение влажности в первой критической точке свидетельствует о переходе части связанной воды в свободную форму.

При минимальной скорости замораживания происходит постепенная надстройка растущих кристаллов льда водой с минимальным солесодержанием. Происходит повышение

солевого содержания в незамерзшем объеме осадка и, как следствие, коагуляция коллоидов с высвобождением части структурированной и физически связанной воды. Образованию крупных флокулов из частиц осадка предшествует изменение электрокинетического потенциала осадка. Электрокинетический потенциал оттаявшего осадка составляет -6 мВ. Замораживание с большой скоростью движения фронта льда приводит к захвату быстрорастущими кристаллами зон воды с повышенным солевым содержанием и частиц осадка. При этом локального повышения концентрации солей не происходит, осадок при размораживании представляет собой более однородную мелкозернистую структуру, неотличимую при визуальном осмотре от исходного осадка.

Опыты с замораживанием осадка позволили определить оптимальные режимы замораживания при скорости движения льда, соответствующей температурам $-5 \div -10$ °С. Количество высвобождаемой в этом режиме свободной воды максимально. На практике поддержание оптимальной скорости замораживания следует проводить за счет высоты разового налива (по формуле 3) и/или формирования из ранее замершего осадка термоизолирующего слоя.

Выводы

1. Осадок ГСВ является слабоструктурированной биокolloидной дисперсной системой с высоким содержанием воды. Влажность осадка в среднем составляет 97%. Средний размер частиц твердой фазы составляет 3 мкм, основное количество частиц имеет диаметр от 1 до 5 мкм. Форма частиц приближается к сферической, фактор формы равен 0,62. Электрокинетический потенциал осадка составил -30 мВ. Статическое напряжение сдвига равно 0,4 Па.
2. Осадок влажностью более 91% является псевдопластическим телом, осадок с влажностью менее 91% – вязкопластичным. Зависимость между концентрацией сухого вещества в сброженном осадке и динамическим напряжением сдвига выражается формулой: $\tau_{\text{дин}} = 6 \cdot 10^{-6} \cdot C^{3,815}$.
3. Максимальное количество свободной воды образуется при скоростях замораживания 1 – 2 мм/час. Оттаявший осадок характеризуется минимальным удельным сопротивлением фильтрации $3 \cdot 10^{10}$ см/г и максимальной скоростью капиллярного всасывания 115 см/час. Электрокинетический потенциал оттаявшего осадка составил -8 мВ.

Литература

1. Технический справочник по обработке воды. Degremont. Т. 2. С-Петербург: «Новый журнал», 2007.
2. Туровский И.С. Осадки сточных вод. Обезвоживание и обеззараживание. М: «ДеЛи принт», 2008.
3. Веригина Е.Л., Козлов М.Н., Данилович Д.А. Площадки естественной сушки// Материалы Межд. научн. конф. IWA, 2006, с.65-72.

Изменение эффективности работы химического оборудования в процессе эксплуатации

К.т.н. А.А.Топоров, д.т.н., проф. А.С.Парфенюк
Донецкий национальный технический университет
mahp@feht.dgtu.donetsk.ua

Аннотация. Рассмотрены закономерности изменения эффективности работы химического оборудования на различных стадиях его жизненного цикла.

Ключевые слова: химическое оборудование, жизненный цикл технического объекта, эксплуатация, эффективность.