

УДК 628.33

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.121763

# ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ СТОЧНЫХ ВОД МОЛОКОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Шевченко А. А., Шевченко Т. А., Пинчук О. Л., Куницкий С. А., Мясоедов А. Ю.

## 1. Введение

Перемешивание жидких сред – процесс, широко применяемый в пищеперерабатывающей и других отраслях промышленности для приготовления эмульсий, суспензий и получения гомогенных систем (растворов), а также для интенсификации реакционных, тепловых и диффузионных процессов [1]. На молокоперерабатывающих предприятиях образуются сточные воды, которые характеризуются повышенным содержанием органических загрязнений, жиров, поверхностно-активных веществ и др. Поэтому очистка указанных стоков очень часто протекает с применением коагулянтов [2, 3].

Обработка воды коагулянтами является самым распространенным методом очистки как природных, так и сточных вод. Гидродинамический режим смешения (гидравлический, пневматический и другие методы) раствора коагулянта с водой определяет кинетику образования хлопьев, их размер и плотность и, тем самым, определяет последующие стадии технологии очистки.

Для обеспечения эффективного действия коагулянта его необходимо немедленно диспергировать до получения однородного распределения, причем эта операция должна быть выполнена до выпадения осадка гидроксидов [4].

Выбор гидродинамического режима смесителя является сложной технологической задачей. Это обусловлено тем, что процесс образования хлопьев гидролизированных форм коагулянтов (гидроксидов алюминия или железа) является сложным. Образование хлопьев гидроксидов коагулянтов определяется большим числом факторов: интенсивностью перемешивания, мутностью исходной воды, вводимой дозой и типом коагулянта, температурой и т. д. В то же время известно, что гидродинамический режим, создаваемый механическими смесителями, более эффективен [5].

Для смешения реагентов чаще всего применяются гидравлические смесители – водоворотные, вихревые, перегородчатые. Также широкое распространение получили смесители с механическим перемешиванием. Главное положительное отличие механического перемешивания перед другими методами интенсификации процесса коагуляции – возможность регулировать интенсивность смешивания в зависимости от качества, температуры и расхода обрабатываемой воды. Это позволяет снизить время пребывания воды в

смесителе, что дает возможность уменьшить его объем и, соответственно, снизить капитальные затраты при одном и том же расходе воды.

Чем более эффективный процесс коагуляционной обработки воды, тем лучше протекает процесс флокуляции [4, 6]. В случае неполного смешивания происходит местная нехватка концентрации реагента или наоборот местная передозировка, что приводит к некачественному протеканию процесса очистки. Поэтому определение параметров перемешивания, является одной из наиболее важных задач.

Применение минеральных коагулянтов в технологических схемах очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий является распространенным приемом. Это позволяет интенсифицировать процесс физико-химической очистки стоков. Однако процесс коагуляции имеет ряд трудностей, связанных с ведением и быстрым смешением коагулянта с обрабатываемой сточной водой. Поэтому исследования, приведенные в работе, направлены на изучение влияния скорости перемешивания коагулянта со сточной жидкостью на эффективность процесса коагуляции.

## **2. Объект исследования и его технологический аудит**

*Объект исследования* – процесс смешения коагулянта со сточными водами молокоперерабатывающего производства с помощью мешалки при различных скоростях вращения.

Смесители, которые применяются для коагуляционной обработки, можно разделить на два основных типа: пропеллерные и статические.

Пропеллерные смесители имеют цилиндрическую (стальные) или кубическую конфигурации и оснащены лопастной мешалкой, которая может вращаться с высокой скоростью.

В зависимости от конструкции аппаратов время пребывания в них варьируется от 1 до 3 мин. Градиент скорости может составлять от 100 до  $1000 \text{ с}^{-1}$  в зависимости от конкретного применения аппарата. Реагент водится в зону наибольшей турбулентности выше или ниже мешалки в зависимости от режима работы (всасывание или нагнетание). В тех случаях, когда градиент скорости необходимо изменить в зависимости от температуры или уровня загрязнения воды, которая обрабатывается, мешалку оснащают регулятором скорости вращения.

Статические смесители устанавливаются непосредственно на трубопроводах или открытых каналах. Статические смесители, встраиваемые в трубопроводы, характеризуются очень высокими градиентами скорости (от 1000 до  $30000 \text{ с}^{-1}$ ) и малым временем пребывания воды в нем [4].

Проведенные автором [5] исследования в области интенсификации проведения процесса коагуляционной очистки воды показали, что одним из методов повышения эффективности очистки воды является обеспечение оптимальных условий смешения реагентов с водой.

В тоже время, вопрос определения оптимальных параметров перемешивания для сточных вод молокоперерабатывающих предприятий остаётся открытым.

### **3. Цель и задачи исследования**

*Цель исследования* – изучение влияния интенсивности перемешивания на эффективность очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий при коагуляционной обработке.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих основных задач:

1. Установить влияние режима перемешивания раствора модельных сточных вод с коагулянтом на эффективность процесса коагуляции.
2. Получить графические и математические зависимости изменения коэффициента светопоглощения от интенсивности перемешивания.

### **4. Исследование существующих решений проблемы**

Большой вклад в развитие теории перемешивания и практических решений при проектировании перемешивающих устройств сделан авторами работ [7, 8]. Согласно работе [9] для обработки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий наибольшее распространение в Украине получили коагулянты сульфат алюминия, сульфат и хлорид железа. При этом эффективность работы коагулянтов составила 53 % по химическому потреблению кислорода (ХПК), по взвешенным веществам – 93 %, по жирам – 97 %, что является достаточно эффективным показателем предварительной очистки сточных вод.

Однако развитие технологий и практический опыт работы перемешивающих устройств в различных отраслях промышленности выявил ряд проблем в их работе.

Авторы работы [10] установили, что процесс образования хлопьев в результате обработки воды коагулянтами, зависит не только от интенсивности перемешивания (градиент скорости), но и от температуры обрабатываемой жидкости и исходной мутности.

Быстрое перемешивание после дозирования коагулянта является важным параметром проектирования согласно данным работы [11]. Коагулянт должен равномерно смешиваться с водой. В случае неполного смешивания происходит местное недостаточное концентрирование реагента или наоборот местная передозировка, что приводит к некачественному протеканию процесса очистки. Поэтому поиск оптимального перемешивающего устройства является одной из самых важных задач.

Одним из решений по быстрому и полному перемешиванию реагентов с сточными водами является конструкция смесителя, представленная в работе [12]. Исследования по работе указанного оборудования, свидетельствуют о достижении градиента скорости  $300 \text{ с}^{-1}$  за время от 10 до 60 с. Это позволяет быстро и качественно производить перемешивание стоков и растворов реагентов.

В работе [13] авторами проанализирована классическая теория расчета полезной мощности мешалки и выделены недостатки в расчетах. Для учета указанных недостатков авторы предложили применить метод конечных элементов в его современном приложении – вычислительной гидродинамике.

Вычислительная гидродинамика при решении задачи позволяет в максимальной степени учесть геометрию задачи, и, таким образом, не накладывает на расчетную схему ограничений, связанных с необходимостью упрощения конструкции мешалки или внутренних устройств аппарата.

Работа [14] посвящена вопросу гидродинамического эффекта стационарной устойчивой циркуляции в вертикальной плоскости жидкости, помещённой во вращающийся вокруг вертикальной оси цилиндр. Как показали эксперименты, при увеличении скорости вращения жидкости больше некоторой критической величины, возникает устойчивая стационарная циркуляция в вертикальной плоскости. Это может вызывать эффективный подъём придонных слоёв воды, т. е. эффективное перемешивание водных масс с одновременным насыщением (аэрацией) их воздухом (кислородом).

Для интенсификации процесса перемешивания воды с реагентами авторами [15] предложена конструкция мешалки с наклонным рабочим колесом. Согласно проведенным экспериментальным исследованиям, в области ламинарного потока наклонное рабочее колесо может уменьшить время смешивания по сравнению с мешалкой с вертикально расположенным рабочим колесом.

Авторами работы [16] предложена конструкция дифференциальной мешалки для повышения эффективности смешивания водных растворов. Проведены параметрические исследования и на их основании выполнена оптимизация формы указанной конструкции мешалки. При сравнении двух конструкций мешалок (стандартной и дифференциальной) авторами были выявлены недостатки стандартной мешалки при больших количествах оборотов (свыше 150), а именно: образуется вихрь в центре жидкости, что вызывает деформацию мешалки, выделение пузырьков газов и кавитацию.

## 5. Методы исследования

Лабораторные исследования проводили на модельных сточных водах, представляющих водные растворы молочных продуктов с добавлением моющих веществ (щелочи или кислоты). Концентрация молочных продуктов в таких растворах подбиралась таким образом, чтобы она соответствовала содержанию жира и белка в реальных стоках молокоперерабатывающих предприятий.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы следующие приборы и материалы:

1. Проба сточных вод – 5 литров (модельные сточные воды).
2. Коагулянт – 3 %-ный раствор хлорида железа  $FeCl_3$ .
3. Перемешивающее устройство (электромагнитная мешалка MS–H280–Pro производства фирмы «ChemLand», Польша).
4. Устройство для определения сравнительной характеристики мутности воды (спектрофотометр DR 1900 производства фирмы «Hach LANGE», США).

Порядок проведения исследования: общая проба модельных сточных вод была разделена на несколько порций по 150 мл каждая (2 серии опытов по 5 порций). В каждой порции определяли исходные температуру и pH. Затем

методом пробного коагулирования определили необходимую дозу коагулянта и дозу нейтрализации рН при скорости 200 об/мин и времени перемешивания 1 мин.

После обработки порции модельного стока реагентами и перемешивания на магнитной мешалке определяли на спектрофотометре коэффициент светопоглощения по истечении 60 мин для осаждения. По полученным результатам были построены зависимости коэффициента светопоглощения от скорости перемешивания.

## 6. Результаты исследования

Перемешивание раствора реагента с модельным раствором проводили с помощью перемешивающего устройства – электромагнитной мешалки. Необходимый объем сточной воды в емкости для перемешивания помещали на мешалку, устанавливали заданный режим перемешивания и дозировали коагулянт. В процессе перемешивания для каждой порции модельного стока устанавливали определенное значение частоты вращения мешалки (100–1500 об/мин). После истечения заданного времени перемешивания (1 мин) мешалку выключали, сточную воду заливали в отстойную колонну. Для проведения сравнительной характеристики мутности воды после отстаивания применяли специальное устройство – спектрофотометр. По данным, полученным на спектрофотометре, построили кривую зависимости коэффициента светопоглощения от скорости вращения мешалки. Эксперименты проводили при разных скоростях вращения.

Выбор наилучшего режима смешения реагентов и хлопьеобразования проводили путем сравнения полученных экспериментальных данных коэффициента светопоглощения обработанного модельного стока для исследуемых режимов перемешивания.

Оценка качества коагуляции выполнялась по измерению чистоты фильтрата (по величине коэффициента светопоглощения). Измерения коэффициента светопоглощения с помощью спектрофотометра проводились при длине волн 800 нм и 480 нм.

Модельная проба сточных вод была получена путем растворения молкосодержащих продуктов в воде. Состав и процентное соотношение модельной пробы сточных вод приведены в табл. 1. Общий объем каждой полученной модельной пробы сточных вод составил 5 л.

**Таблица 1**

Состав и процентное соотношение модельной пробы сточных вод

Массовая доля, %		Продукт	Содержание жира, %
Проба №1	Проба №2		
5,0	1,5	молоко	3,2
3,0	1,0	кислое молоко	3,0
1,0	0,5	сметана	18
92,0	97,0	вода	0

После смешивания всех продуктов проба выдерживалась в течении 30 мин. Далее общая модельная проба была разделена на несколько порций по 150 мл каждая (рис. 1). Каждая порция модельных сточных вод обрабатывалась растворами реагентов. В модельные сточные воды пробы № 1 были введены 5 мл 5 %-ного раствора щелочи NaOH для нейтрализации pH и 1,8 мл 3 %-ного раствора хлорида железа FeCl<sub>3</sub> для коагуляции. Для пробы модельных сточных вод № 2 были введены 1,2 мл 5 %-ного раствора щелочи NaOH для нейтрализации pH и 1,8 мл 3 %-ного раствора хлорида железа FeCl<sub>3</sub> для коагуляции.



**Рис. 1.** Порции модельных сточных вод до введения коагулянта

Доза коагулянта является подобранной дозой, полученной в процессе пробного коагулирования. Несмотря на то, что при изменении состава модельных сточных вод оптимальная доза коагулянта могла измениться, было принято решение оставить ту же дозу коагулянта согласно составу пробы с нейтрализацией pH. Это было сделано для соблюдения установившихся параметров эксперимента и возможности их дальнейшего сравнения между собой.

До перемешивания на магнитной мешалке порция модельного стока имела следующие качественные параметры:

- pH=7 (нейтральная среда обеспечена введением щелочи);
- температура модельного стока – 19 °С.

Реагенты добавлялись в порции модельных сточных вод во время перемешивания на магнитной мешалке (рис. 2). Время перемешивания – 1 мин. Форма якорька магнитной мешалки – цилиндрическая, размеры якорька – 40×8 мм, диаметр емкости – 70 мм, высота емкости – 45 мм.

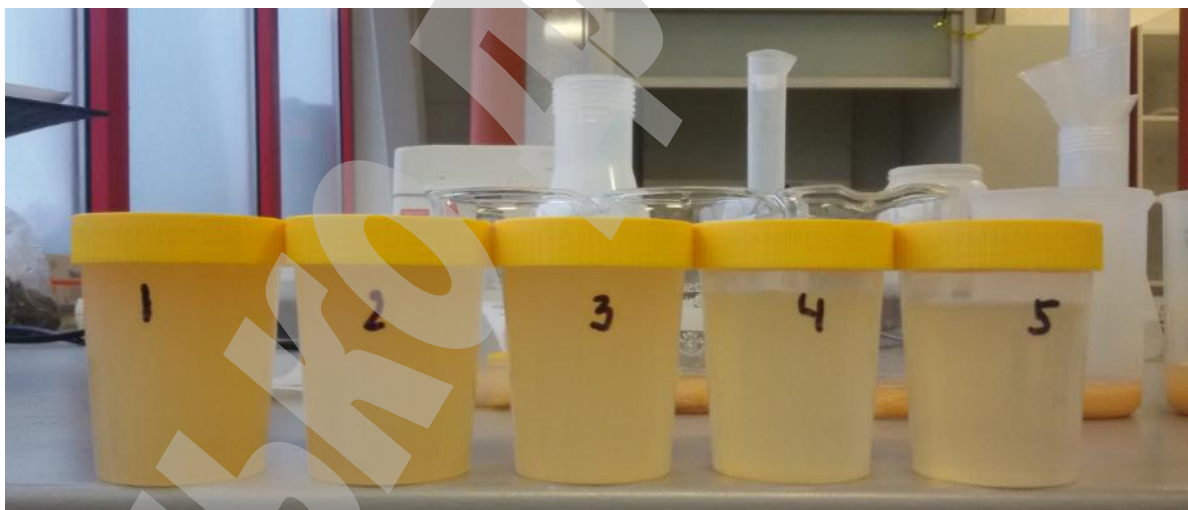
В процессе проведения эксперимента скорость перемешивания варьировалась в таких пределах:

- 1 серия (модельная проба № 1) – 300–1100 об/мин;
- 2 серия (модельная проба № 2) – 100–1500 об/мин.



**Рис. 2.** Перемешивание модельных сточных вод с коагулянтom на магнитной мешалке

Обработанные пробы были оставлены на 60 мин для седиментации. После чего каждую из них было профильтровано на грубом фильтре (рис. 3). Далее на спектрофотометре были определены коэффициенты светопоглощения при длинах волны  $\lambda=800$  нм и  $\lambda=480$  нм. Полученные результаты приведены в табл. 2.



**Рис. 3.** Модельные сточные воды пробы № 2 после фильтрования на грубом фильтре

Таблица 2

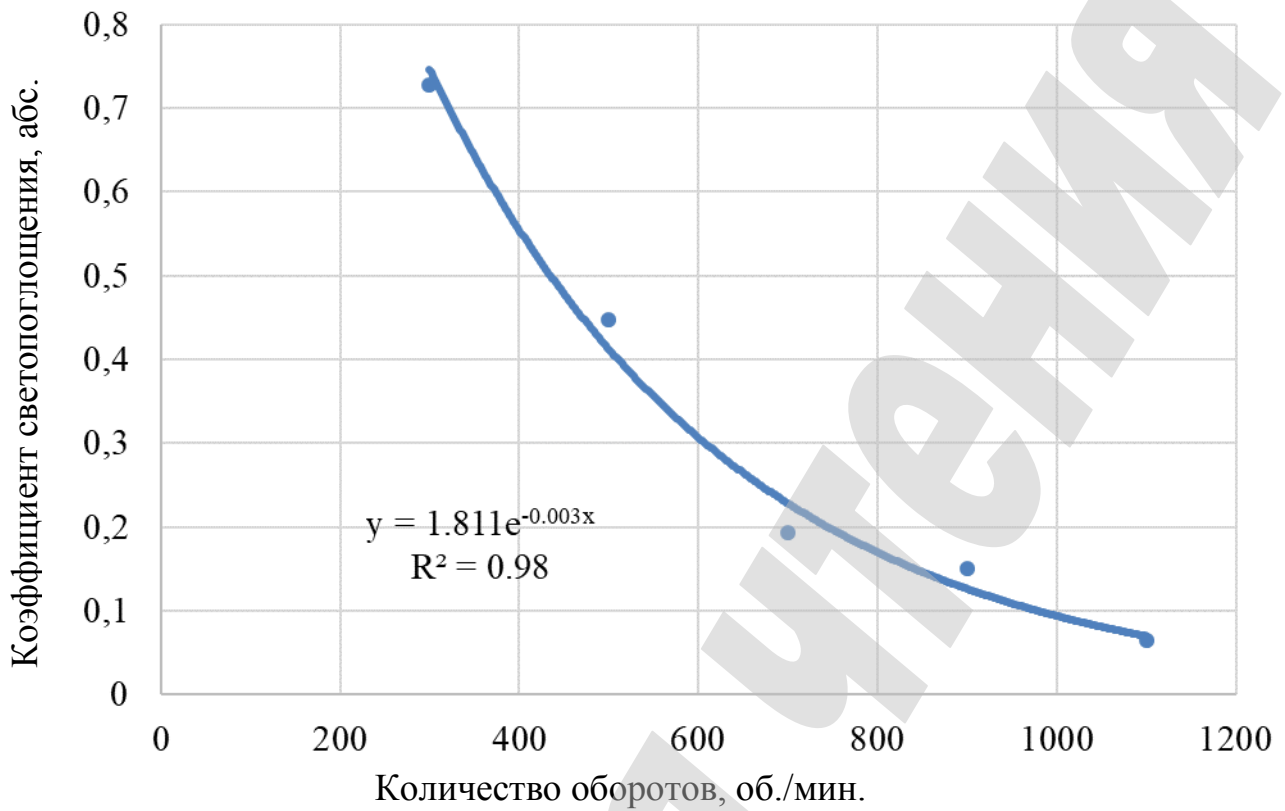
Значения коэффициента светопоглощения при перемешивании в мешалке в зависимости от скорости перемешивания

№ п/п	Количество оборотов, n, об/хв	Длина волны спектрофотометра, $\lambda$ , нм	Коэффициент светопоглощения, A, абс.
1	Модельные сточные воды проба № 1		
1.1	300	800	0,728
1.2	500	800	0,447
1.3	700	800	0,194
1.4	900	800	0,151
1.5	1100	800	0,065
2	Модельные сточные воды проба № 2		
2.1	100	800	1,544
2.2	200	800	1,124
2.3	400	800	0,647
2.4	800	800	0,314
2.5	1500	800	0,168
3	Модельные сточные воды проба № 2		
3.1	100	480	2,894
3.2	200	480	2,468
3.3	400	480	1,765
3.4	800	480	0,932
3.5	1500	480	0,598

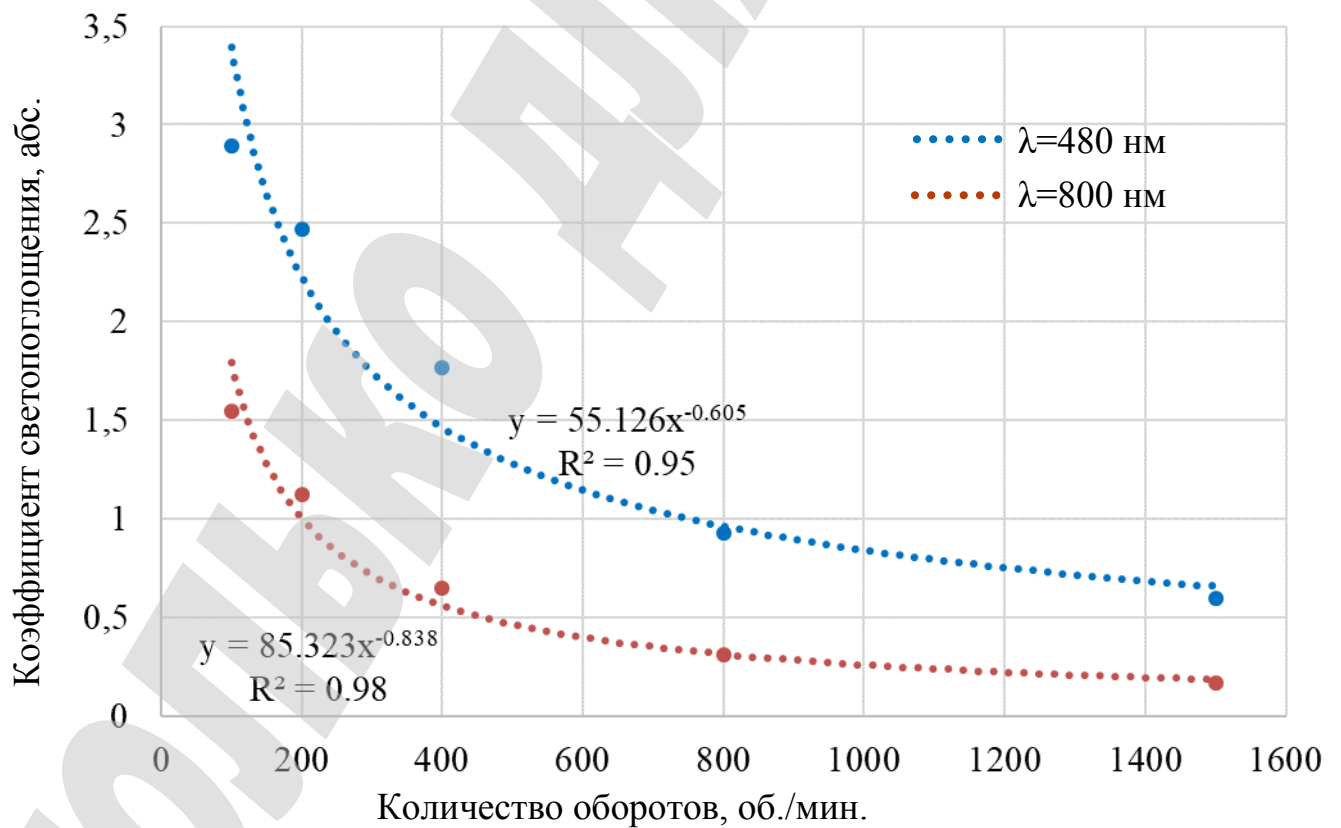
По данным табл. 2 были получены математические и графические зависимости коэффициента светопоглощения от скорости перемешивания при коагуляции модельных сточных вод (рис. 4, 5), которые отвечают экспоненциальной функции с высокой степенью корреляции ( $R^2=0,98$ ).

Для сравнения полученных результатов показателей коэффициента светопоглощения при разной длине волны спектрофотометра,  $\lambda=800$  нм и  $\lambda=480$  нм были получены графическая и математическая зависимости между коэффициентом светопоглощения и мутностью (рис. 6).

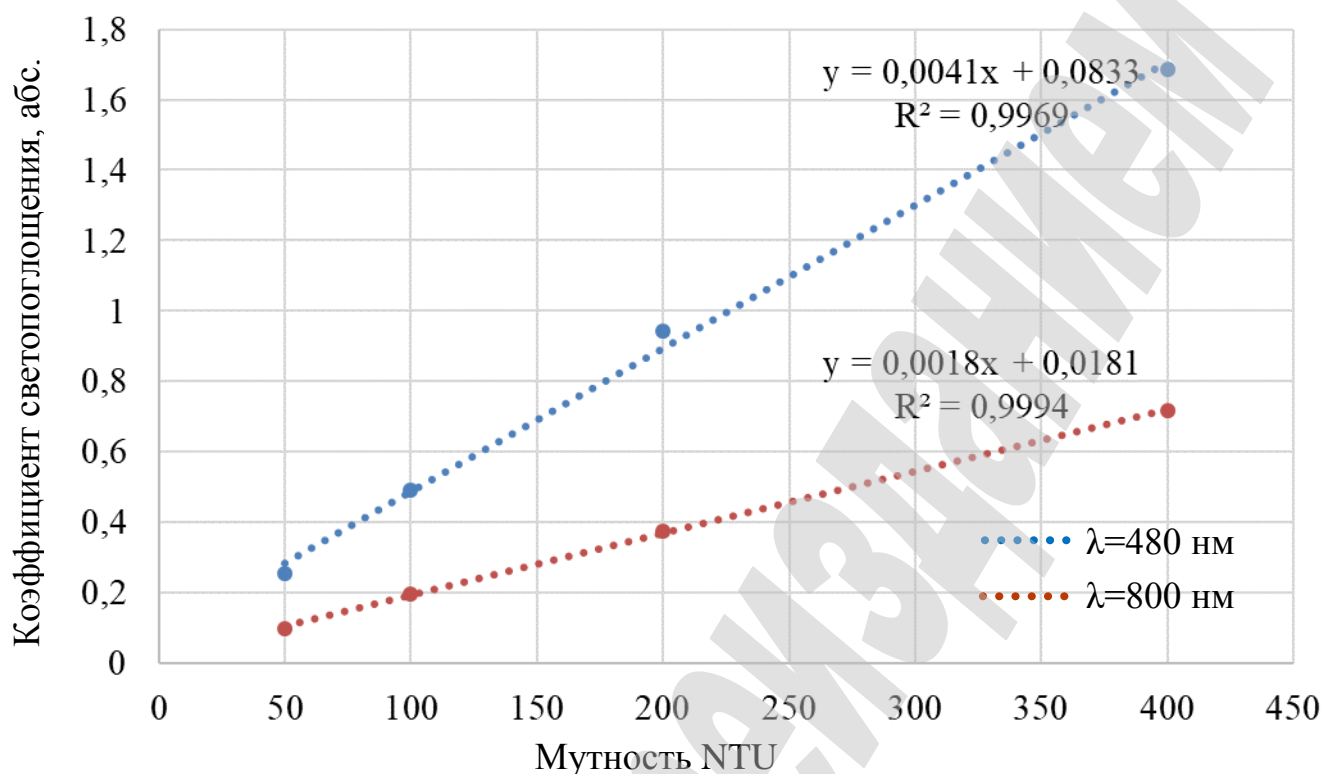




**Рис. 4.** Зависимость коэффициента светопоглощения от скорости перемешивания при коагуляции модельного раствора (проба № 1)



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента светопоглощения от скорости перемешивания пробы № 2 при длине волн  $\lambda = 800$  нм и  $\lambda = 480$  нм



**Рис. 6.** Зависимости мутности от коэффициента светопоглощения при измерениях при различных длинах волн спектрофотометра

В результате изучения полученных графиков (рис. 4–6) было установлено, что изменение скорости перемешивания модельного раствора сточных вод с коагулянтом хлоридом железа значительно влияет на процесс коагуляции. Качество протекания процесса коагуляции было оценено при измерении чистоты полученного фильтрата по величине коэффициента светопоглощения на спектрофотометре.

Результаты показали экспоненциальную зависимость качества процесса коагуляции от скорости перемешивания с высоким коэффициентом корреляции ( $R^2=0,98$ ). Характер полученных кривых указывает на то, что в диапазоне скоростей вращения мешалки 100–800 об/мин коэффициент светопоглощения снижается с величины 1,544 до 0,314, что составляет 79,7 %. При этом при скорости вращения мешалки в диапазоне 800–1500 об/мин эффективность коагуляции практически не изменяется и достигает максимального значения по коэффициенту светопоглощения 0,168, что составляет 89,1 %. Поэтому, можно сделать вывод, что диапазон скоростей вращения мешалки 800–1500 об/мин является оптимальным для достижения максимального эффекта протекания процесса коагуляции при очистке сточных вод молокоперерабатывающих предприятий.

Уменьшение значения коэффициента светопоглощения было значительным, следовательно, фактор перемешивания является существенным при проведении процесса коагуляции сточных вод молокоперерабатывающих предприятий. Согласно полученным результатам исследований существует необходимость усовершенствования качества перемешивания коагулянта со

сточными водами. Последнее позволит повысить качество очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий.

## **7. SWOT-анализ результатов исследований**

*Strengths.* Проведенные исследования показали целесообразность определения режимов перемешивания коагулянта с обрабатываемой сточной водой для обеспечения оптимальных параметров перемешивания в смесительных устройствах. Это позволит более полно использовать коагулирующую способность реагентов, осуществлять полное и быстрое перемешивание со сточной жидкостью. Это в конечном итоге приведет к экономии затрат на реагенты и оптимизации работы всей технологической схемы очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий.

*Weaknesses.* Введение эффективного узла перемешивания коагулянта со сточной жидкостью ведет к дополнительным трудовым затратам. Данный узел требует квалифицированного обслуживания и контроля гидродинамических показателей смешивающихся потоков жидкостей.

*Opportunities.* Качественное, быстрое и полное перемешивание коагулянта со сточной жидкостью позволит интенсифицировать процесс физико-химической очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий. Это, в свою очередь, повлечет за собой нормальное протекание дальнейших этапов очистки.

*Threats.* На эффективность процесса перемешивания сточных вод и коагулянта влияют качественные параметры стоков (концентрации загрязнений, pH, температура и т. д.) и параметры перемешивающего устройства. Поэтому резкое изменение качественных и количественных параметров стоков может привести к нарушению процесса перемешивания и влияет на эффективность очистки в целом.

## **8. Выводы**

1. В результате проведения экспериментальных исследований по изучению влияния скорости перемешивания раствора модельных сточных вод с коагулянтом хлоридом железа было установлено, что режим перемешивания оказывает значительное влияние на эффективность процесса коагуляции. Так, при количестве оборотов мешалки 1500 об/мин эффективность очистки достигала 89,1 %.

2. По результатам проведенных экспериментов получены графические и математические зависимости изменения коэффициента светопоглощения от интенсивности перемешивания с высокой степенью корреляции ( $R^2=0,98$ ). Характер полученных кривых указывает на то, что в диапазоне скоростей вращения мешалки 100–800 об/мин эффективность очистки составляла 79,7 %. При скорости вращения мешалки в диапазоне 800–1500 об/мин эффективность коагуляции практически не изменяется и достигает максимального значения 89,1 %. Уменьшение значения коэффициента светопоглощения было значительным, следовательно, фактор перемешивания является существенным

при проведении процесса коагуляции сточных вод молокоперерабатывающих предприятий.

Результаты проведенных исследований подтверждают целесообразность определения режимов перемешивания коагулянта с обрабатываемой сточной водой для обеспечения оптимальных параметров перемешивания в смесительных устройствах. Интенсивность перемешивания оказывает значительное влияние на эффективность коагуляции и, как следствие, эффективность очистки сточных вод.

### Литература

1. Ivanets V. N., Lobasenko B. A. *Metody intensivifikatsii gidromekhanicheskikh protsessov: handbook*. Kemerovo: Kemerovo Institute of Food Science and Technology, 2003. 84 p.

2. Shevchenko T., Shevchenko A. *Intensifikatsiia raboty flotatsionnoi ustanovki pri ochildke stochnyh vod predpriatii molochnoi promyshlennosti* // *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*. 2015. Vol. 59. P. 151–156.

3. Shevchenko A., Shevchenko T. *Computer simulation of hydraulic flow in a mixing device with a diaphragm of special design installed in it* // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3, No. 7 (87). P. 33–39. doi:[10.15587/1729-4061.2017.100835](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.100835)

4. DEGREMONT. *Tekhnicheskii spravochnik po obrabotke vody: translation from French*. Saint Petersburg: Novyi zhurnal, 2007. Vol. 1. 878 p.

5. Moiseev A. V. *Intensifikatsiia protsessov koagulyatsii i flokulyatsii prirodnyh vod za schet reguliruemogo mekhanicheskogo peremeshivaniia v smesiteliah i kamerah hlop'eobrazovaniia ochildnyh sooruzhenii: abstract's PhD thesis: 05.17.08*. Moscow, 2005. 23 p.

6. Alekseeva L. P. *Intensifikatsiia provedeniia protsessa koagulyatsionnoi ochildki vody* // *Nailuchshie Dostupnye Tekhnologii vodosnabzheniia i vodootvedeniia*. 2014. Vol. 3. P. 6–13.

7. Romankov P. G., Frolov V. F., Flisiuk O. M. *Metody rascheta protsessov i apparatov himicheskoi tekhnologii (primery i zadachi): handbook*. Saint Petersburg: HIMIZDAT, 2009. 544 p.

8. Mihir Sh. *Process Engineering: Agitation & Mixing*. Nadiad, Gujarat: Anchor Institute Dharamsinh Desai University, 2014. 164 p.

9. Epoian S. M., Fomin S. S., Shilin V. V. *Otsenka effektivnosti raboty koagulyantov pri ochildke proizvodstvennyh stochnyh vod molokopererabatyvaiushchih predpriatii* // *Naukovyi visnyk budivnytstva*. 2016. Vol. 3. P. 151–154.

10. WATER TREATMENT. *Coagulation and flocculation*. URL: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Coagulation-and-flocculation-1.pdf> (Last accessed: 04.11.2017).

11. Mordanov S. V., Syromiatnikov S. N., Homiakov A. P. *Metodika rascheta poleznoi moshchnosti mekhanicheskogo peremeshivaiushchego ustroistva* // *Trudy*

nauchnoi konferentsii «Dostizheniia v himii i himicheskoi tehnologii». Ekaterinburg, 2011. P. 9–14.

12. Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment. URL: <https://www.iwapublishing.com/news/coagulation-and-flocculation-water-and-wastewater-treatment> (Last accessed: 17.12.2017).

13. Rasha A. J. Effect of Temperature on Floc Formation Process Efficiency and Subsequent Removal in Sedimentation Process // Journal of Engineering and Development. 2014. Vol. 18, No. 4. P. 176–187.

14. Rykov S. V., Mamina D. H. Gidrodinamicheskii effekt i vozmozhnosti ego prakticheskogo primeneniia // Internet-zhurnal «Naukovedenie». 2013. Vol. 6. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/148TVN613.pdf> (Last accessed: 04.11.2017).

15. Laminar Mixing in Stirred Tank Agitated by an Impeller Inclined / Takahashi K. et al. // International Journal of Chemical Engineering. 2012. Vol. 2012. P. 1–10. doi:[10.1155/2012/858329](https://doi.org/10.1155/2012/858329)

16. Asiri S. Design and Implementation of Differential Agitators to Maximize Agitating Performance // International Journal of Mechanics and Applications. 2012. Vol. 2, No. 6. P. 98–112. doi:[10.5923/j.mechanics.20120206.01](https://doi.org/10.5923/j.mechanics.20120206.01)