

А. М. Когановский, А. М. Клименко

**Очистка и использование
сточных вод в
промышленном
водоснабжении**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 66.0
ББК 35
А11

A11 **А. М. Когановский**
Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении / А.
М. Когановский, А. М. Клименко – М.: Книга по Требованию, 2012. – 288 с.

ISBN 978-5-458-25211-9

ISBN 978-5-458-25211-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из важнейших вопросов защиты окружающей среды является охрана водного бассейна от загрязнения. В утвержденных XXVI съездом КПСС «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года» поставлены задачи: «Увеличить мощности систем оборотного и повторного использования вод, разрабатывать и внедрять на предприятиях бессточные системы водопользования*». К важным мероприятиям по охране источников питьевой воды относятся доочистка промышленных и городских сточных вод и дальнейшее их использование для промышленного водоснабжения предприятий. Повторное использование очищенных сточных вод для технического водоснабжения позволит в ряде районов нашей страны полностью ликвидировать существующий дефицит ресурсов пресной воды.

Наиболее опасны для водоемов сточные воды предприятий химической и нефтехимической промышленности, несмотря на то, что объем их по сравнению с объемом сточных вод предприятий других видов промышленности невелик. Сточные воды предприятий химической и нефтехимической промышленности характеризуются сложным и переменным составом, высокой токсичностью, преимущественным содержанием растворенных, а не взвешенных, загрязнений, поэтому биологические методы не всегда обеспечивают очистку, достаточную для повторного использования воды на предприятиях.

Физико-химические или химические методы очистки сточных вод наряду с обеспечением необходимого качества воды в соответствии с требованиями водоподготовки позволяют также извлечь из сточных вод ценные продукты и снизить потери производства. В последние годы эти методы находят широкое применение и для доочистки биологически очищенных сточных вод, после которой их успешно можно использовать в технологических и энергетических циклах.

Замена природных пресных вод, расходуемых на технологические и энергетические нужды, очищенными сточными водами позволит решить проблему ликвидации дефицита водных ресурсов и предотвратить истощение запаса пресных вод. Одним из наиболее радикальных путей необходимого сокращения потребления свежей воды является создание замкнутых систем промышленного водоснабжения, основанных на многократном использовании для производственных целей сточных вод, очищенных до норм, отвечающих требованиям к качеству технической воды. Несмотря на актуальность проблемы, до настоящего времени ни в отечественной, ни в зарубежной литературе не рассмотрена методика выбора способа очистки сточных вод, не дается обоснования наиболее рациональных технологических схем и не разработаны оптимальные параметры процессов водоподготовки с использованием сточных вод в качестве основных ресурсов промышленного водоснабжения.

В предлагаемой книге сделана попытка решить эти вопросы на базе теории процессов адсорбции, ионного обмена, коагуляции, пенной сепарации.

Авторы выражают благодарность П. Ф. Кандзасу за полезные замечания, сделанные при рецензировании книги.

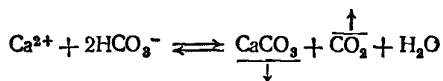
* Материалы XXVI съезда КПСС. М., Издательство политической литературы. 1981, с. 183.

ГЛАВА I

УСЛОВИЯ МНОГОКРАТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

1. ТРЕБОВАНИЯ К ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ВОДЫ, ПРИМЕНЯЕМОЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Требования к химическому составу технической воды определяются условиями использования ее в конкретных технологических процессах. Наибольшее количество воды расходуется в теплообменной аппаратуре на отведение избыточного тепла. Только на компенсацию потерь воды в оборотных системах водоснабжения отдельные предприятия расходуют десятки и даже сотни тысяч кубических метров воды в сутки. В условиях работы оборотных систем многократный нагрев воды до 40—45 °С и охлаждение ее в вентилируемых градирнях или брызгальных бассейнах приводят к потерям диоксида углерода и отложению на поверхностях теплообменников и труб карбоната кальция в соответствии с реакцией



При высокой постоянной жесткости оборотной воды, обусловленной содержанием сульфата кальция, упаривание воды в цикле может привести к превышению произведения растворимости карбоната кальция (растворимость последнего с ростом температуры уменьшается) и образованию прочных карбонатных отложений, удаление которых из труб и теплообменников чрезвычайно затруднительно.

Скорость отложения карбоната кальция и других солей не должна превышать 0,25 г/(м²·ч). Поэтому основным требованием к воде, расходуемой на подпитку оборотных систем, является ограничение ее карбонатной и сульфатной жесткости. Ограничивается в подпитывающей и оборотной воде также содержание взвешенных веществ. Крупные неорганические взвеси (песок) осаждаются в пазухах холодильников, забивают трубки конденсаторов, отлагаются на отдельных участках трубопроводов (на поворотах труб), а мелкие частицы взвеси (илы, глинистые частицы), самостоятельно не осаждающиеся в теплообменной аппаратуре, попадают в состав образующихся отложений карбоната и сульфата кальция, повышая их прочность.

Содержание растворимых солей (щелочных металлов, магния) в оборотной воде растет пропорционально коэффициенту ее упаривания. При этом возрастает и коррозионная активность воды, причем коррозия материалов теплообменных систем в мягкой воде, содержащей растворенный кислород, существенно выше, чем в жесткой воде такой же минерализации, что связа-

но с меньшей буферной емкостью мягких вод. В отсутствие ингибиторов предельное содержание солей в оборотной воде не рекомендуется допускать выше 2 кг/м³, хотя в отдельных случаях минерализация оборотной воды достигает 3 кг/м³. Наконец, для предотвращения интенсивного биологического обрастания сооружений и аппаратов теплообменных оборотных систем водоснабжения в оборотной, а следовательно и в подпитывающей воде должно быть ограничено содержание органических веществ и соединений биогенных элементов (азота, фосфора), являющихся питательной средой для микроорганизмов, вносимых в систему со свежей водой.

Допустимая скорость биологических обрастаний теплообменных аппаратов не должна превышать 0,07 г/(м²·ч); рост толщины слоя не должен быть выше 0,05 мм в месяц. Сопоставление требований к качеству оборотной воды в теплообменных системах водоснабжения, приведенное в табл. I-1, показывает, что несмотря на значительные расхождения оценок допустимых пределов общей жесткости, солесодержания, концентрации взвешенных веществ, эти требования имеют много общего при рекомендации таких наиболее важных показателей, как карбонатная жесткость, величина рН, содержание биогенных элементов и значение ХПК, определяющих термостабильность и интенсивность биообрастаний в оборотной системе.

На основании этих данных можно определить требования к воде для компенсации потерь в оборотных системах теплообменного водоснабжения (стабилизационный сброс оборотной воды с целью «продувки» системы, капельный унос воды с воздухом на градирнях, испарение, потери при фильтровании взвеси и по различным производственным причинам). Необходимое количество подпитывающей воды можно определить из материального баланса оборотной системы [6]

$$Q_{уп} + Q_{сб} + Q_{ф} + Q_{пр.п} + Q_{исп} = Q_{п} \quad (I-1)$$

где $Q_{уп}$ — количество воды, уносимой в виде капель ветром на градирнях; $Q_{сб}$ — количество оборотной воды, сбрасываемой для «продувки»; $Q_{ф}$ — количество воды, теряемой с осадком при фильтровании; $Q_{пр.п}$ — количество производственных потерь воды; $Q_{исп}$ — количество воды, испаряющейся на градирях; $Q_{п}$ — количество подпитывающей воды, компенсирующей все потери оборотной воды в системе.

Допустимое содержание солей или отдельных ионов других веществ в подпитывающей воде определяется условием сохранения постоянства состава оборотной воды, циркулирующей в системе

$$Q_{п}C_{п} = (Q_{уп} + Q_{сб} + Q_{ф} + Q_{пр.п})C_{об} \\ C_{п} = \frac{C_{об}(Q_{уп} + Q_{сб} + Q_{ф} + Q_{пр.п})}{Q_{п}} \quad (I-2)$$

Средние потери воды от испарения составляют около 2,5%, от капельного уноса на градирнях 0,3—0,5%, величина проду-

Таблица 1-1. Требования к качеству воды в охлаждающей системе оборотного водоснабжения

Показатели качества	Рекомендуемые величины				
	в СССР			в странах СЭВ [1, 4]	в США [4, 5]
	ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР [1]	азотная промышленность [2]	хлорная промышленность [3]		
Температура, °С	25—40	28—30	25—30	25—28	—
Жесткость общая, г-экв/м ³	≤7	1,5—2,5	5,5	≤7	—
Жесткость карбонатная, г-экв/м ³	≤2,5	1,5—2,5	≤3	1,5—2,5	2,5—5,0
Щелочность, г-экв/м ³	3—4		2—4	2—4	2,5
Общее солесодержание, г/м ³	1300—2000	≤1200	800—1200	≤2000	500
Окисляемость перманганатная, г О ₂ /м ³	≤20	≤15	8—10	≤20	—
ХПК, г О ₂ /м ³	≤200	—	70	—	75
Взвешенные вещества, г/м ³	≤50	20—30	10—20	10—20	5
Масла и смолообразующие вещества, г/м ³	≤20	0,3	0	≤20	—
Поверхностно-активные вещества (ПАВ)	Не нормируются	0	0	—	—
Анионы, г/м ³					
хлоридов (Cl ⁻)	150—300	До 350	150—300	До 350	500
сульфатов (SO ₄ ²⁻)	350—500	≥500	350—500	≥500	200
фосфатов (в пересчете на PO ₄ ³⁻)	—	≥6	1,5—9	≥12	—
соединений азота (в пересчете на аммиак)	6	≥2,4	0,12—2,4	≥36	—
ионы тяжелых металлов	—	—	0	—	—
Растворенный кислород г О ₂ /м ³	—		6—8	6—8	—
Остаточный активный хлор, г/м ³	До 1,0	—	До 1,0	—	—
pH	6,5—8,5	6,5—8,5	6,5—8,5	6,5—8,5	6,5—8,5

вочного сброса колеблется от 6 до 10% и в среднем может быть принята 8%. Сумма всех остальных потерь принимается около 1% от объема оборотной воды.

Пользуясь приведенным выше соотношением, можно сформулировать требования к качеству подпитывающей воды оборотных систем (табл. 1-2). Разумеется, что при использовании для подпитки систем сточных вод вместо свежей пресной воды, эти воды должны полностью отвечать тем же требованиям.

Персвод оборотных систем водоснабжения на режим, не требующий стабилизированного сброса оборотной воды для продувки, позволяет сократить объем воды для подпитки си-

Таблица 1-2. Требования к качеству воды для подпитки теплообменных систем оборотного водоснабжения в химической промышленности

Показатели качества	Для оборотной воды	Требуемые величины для подпитывающей воды	
		при работе со сбросом 8% воды (с продувкой)	при работе без сброса оборотной воды (замкнутый цикл)
Жесткость карбонатная, г-экв/м ³	2,5	2	0,9
Жесткость постоянная, г-экв/м ³	5	4	1,9
Общее солесодержание, г/м ³	1200	900	445
Хлориды (Cl ⁻), г/м ³	300	237	112
Сульфаты, г/м ³	350—500	277—395	119—187
Сумма фосфора и азота, г/м ³	3	2,4	1,1
Взвешенные вещества, г/м ³	30	23,6	11,2
Окисляемость перманганатная, г О ₂ /м ³	8—15	11,8—12,8	3—5,7
ХПК, г О ₂ /м ³	70	55	26
Масла и смолообразующие вещества, г/м ³	0,3	0,25	0,10

стем, по крайней мере, в три раза и соответственно уменьшить объем капитальных затрат, а также эксплуатационные затраты на водоподготовку. Однако в бессточных «замкнутых» оборотных системах водоснабжения к подпитывающей воде, как видно из табл. 1-2, предъявляются более жесткие требования.

Замена природной воды для подпитки оборотных систем сточными водами требует выбора достаточно крупного (по масштабам сброса) источника сточных вод с относительно постоянной характеристикой загрязнений. Такими сточными водами являются в первую очередь биологически очищенные смеси городских и промышленных сточных вод. Основные показатели качества этих сточных вод приведены в табл. 1-3. Эти данные

Таблица 1-3. Санитарно-химическая характеристика биологически очищенных городских сточных вод [7]

Показатели качества	Сточные воды	
	в Киеве	в Первомайске (Харьковская область)
ХПК, г О ₂ /м ³	35—40	35—40
Общее солесодержание, г/м ³	400—600	1300—1500
Жесткость общая, г-экв/м ³	5—6	7,5—8,5
Содержание катионов и анионов, г/м ³ :		
натрия и калия (Na ⁺ , K ⁺)	—	250—280
хлоридов (Cl ⁻)	90—100	400—420
сульфатов (SO ₄ ²⁻)	120—140	220—240
фосфатов (PO ₄ ³⁻)	0,8	6,7—13,5
аммиака и солей аммония (в пересчете на аммиак)	0,73	2,8—8,8

показывают, что по таким важным характеристикам подпитывающей воды, как жесткость, общее солесодержание, содержание хлоридов и сульфатов, концентрации соединений биогенных элементов и ХПК, биологически очищенные городские воды не отвечают требованиям к подпитывающей воде для замкнутых систем и нуждаются в дополнительном обессоливании. На многих предприятиях химической и нефтехимической промышленности в биологически очищенных сточных водах величина ХПК достигает 150—200 г O_2/m^3 , а солесодержание превышает 2500 г/ m^3 . Поэтому использование биологически очищенных промышленных и городских сточных вод в системах оборотного водоснабжения химических предприятий требует доочистки как от оставшихся органических загрязнений, так и от солей. Степень такой доочистки определяется не только минерализацией и величиной ХПК очищенных сточных вод, но и величиной пропускной способности оборотных систем, конструкцией теплообменников и гидродинамическим режимом движения жидкости.

При увеличенном стабилизационном сбросе и использовании смеси сточных и природных вод в оборотных системах можно ограничиться относительно несложной доочисткой стоков, например фильтрованием. При использовании в оборотных системах современных типов интенсивных теплообменников и организации замкнутых систем оборотного водоснабжения, как видно из сопоставления табл. I-2 и I-3, биологически очищенные сточные воды должны освобождаться от органических веществ, частично обессоливаться и подвергаться более или менее глубокому умягчению.

Организация замкнутого цикла промышленного водоснабжения предприятия путем возврата очищенных сточных вод в общем случае не может ограничиваться направлением этих стоков в оборотные теплообменные системы. Потребность в воде таких систем во многих отраслях промышленности меньше объема всех промышленных и бытовых биологически очищенных сточных вод промышленного узла, поэтому основная масса воды расходуется для технологических или энергетических процессов. К качеству этой воды требования обычно выше, чем к воде оборотных систем водоснабжения, а в ряде химических, целлюлозно-бумажных производств и в теплоэнергетике расходуется в значительном количестве вода с содержанием солей менее 10—15 г/ m^3 , жесткостью, не превышающей 0,01 г-экв/ m^3 и окисляемостью до 2 г O_2/m^3 .

Наиболее разработаны и научно обоснованы требования к воде, идущей для питания котлов. Для многих технологических нужд отсутствуют точные научно обоснованные требования к воде. Это затрудняет и рассмотрение процессов подготовки сточных вод до параметров, отвечающих этим требованиям. В табл. I-4 приведены основные требования к воде, идущей для питания котлов разных типов, указаны основные показатели качества воды, используемой в целлюлозно-бумажной промыш-

Таблица 1-4. Требования, предъявляемые к качеству технической воды [8, 9]

Показатели качества	Область использования						химическая прочность (наиболее жесткие требования)
	котлы жаротрубные (0,5—1,5 мПа)	котлы высокого давления (5—10 мПа)	прямоточные котлы (10—15 мПа) и прямоточные сверхкритического давления (21,5—30 мПа)	целлюлозно-бумажная промышленность [8]			
				получение древесной массы	сырье неотбеленное	целлюлоза неотбеленная	
Общая жесткость, г-экв/м ³	0,35	0,035 [9] 0 [8]	0,003	—	5	5	0,012 0,05
Щелочность, г-экв/м ³	—	—	—	—	—	—	—
Содержание, г/м ³	Не нормир.	0,7 [8]	0,02	—	50	50	50
диоксида кремния	0,5 [8]	0,05 [8]	0,005 [9]	—	—	—	0,03
меди	—	—	—	—	—	—	0,1
марганца	1 [8]	0,05 [8]	0,01 [9]	0,3	1	0,1	0,1
железа	1 [9]	0,3 [9]	0,01 [9]	—	—	—	—
кислорода	—	—	0,02 [9]	—	—	—	—
нитратов и нитритов	8—10 [8]	8—10 [8]	7—8,5 [9]	6—10	6—10	6—10	7—8
pH	—	—	—	—	—	—	6,2—8,3
Цветность, град.	—	—	—	—	—	—	≤5
Окисляемость, г/м ³	—	—	—	—	—	—	≤4

* Для умягченной воды.

ленности, в производстве химического волокна и химической промышленности.

Использование сточных вод для этих видов промышленного водоснабжения обусловлено возможностью и экономической целесообразностью достаточно глубокой их доочистки в условиях безотходного режима водоподготовки. Ни один отдельно примененный процесс не может обеспечить необходимого эффекта. Требуемое качество технической воды на базе использования промышленных и биологически очищенных сточных вод достигается только рациональным сочетанием ряда физико-химических процессов в едином безотходном технологическом комплексе, которым являются цех доочистки смеси сточных вод и подготовки их для водоснабжения и связанные с этим цехом локальные очистные установки, размещенные в узловых точках формирования наиболее концентрированных и относительно монокомпонентных стоков.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ СТОЧНЫХ ВОД В ПРОМЫШЛЕННОМ ВОДОСНАБЖЕНИИ

Сточные воды как ресурс промышленного водоснабжения можно подразделить на несколько групп в зависимости от экологичности их использования для водоподготовки.

К первой группе следует отнести сточные воды с минерализацией до 3 кг/м^3 , не содержащие органических загрязнений либо содержащие органические вещества, которые можно удалить сорбцией на гидроксидах алюминия и железа при очистке воды коагулянтами или сорбировать активными углями, полимерными смолами и другими материалами с развитой пористостью и поверхностью. Эти сточные воды после очистки от органических веществ можно обессоливать методами ионного обмена.

Ко второй группе целесообразно отнести сточные воды с минерализацией от 3 до $10\text{--}15 \text{ кг/м}^3$. Для обессоливания таких сточных вод пригодны методы электродиализа и обратного осмоса, но применять эти методы можно только после очистки воды от органических веществ, катионов жесткости и железа. Эти методы обессоливания воды в СССР пока еще не нашли применения в установках достаточно большой мощности. Однако в этой области достигнуты успехи, позволяющие надеяться на создание таких установок в ближайшие несколько лет.

К третьей группе следует отнести сточные воды с минерализацией более 15 г/л , обессоливание которых возможно лишь термическими методами. Для защиты внешней среды такие методы деминерализации сточных вод приходится иногда применять, но затраты на их осуществление делают использование сточных вод третьей группы в качестве ресурса водоснабжения промышленности мало перспективными.

Содержание органических веществ в сточных водах, как правило, невелико. В наиболее концентрированных промышленных стоках оно может достигать 2—3%, но чаще концентрация органических растворенных загрязнений не превышает 0,2—0,3%, а в биологически очищенных городских сточных водах она составляет всего 0,01—0,02%. Однако требования к качеству технической воды заставляют ограничить содержание в ней растворенных органических соединений величиной в 10—100 раз меньшей. Глубокая очистка вод основана на концентрировании растворенных веществ и выделении их в виде концентратов. Концентрирование малых количеств загрязнений достигается, прежде всего, методами экстракции, отгонки с водяным паром и сорбции, причем экстракцию и отгонку используют лишь для очистки концентрированных промышленных стоков, образующихся на отдельных стадиях производства (преимущественно в органическом синтезе), тогда как сорбционные процессы, обеспечивающие наиболее высокое качество очистки, применяют на заключительной стадии водоподготовки для доочистки биологически очищенных сточных вод [10, 11] или общезаводской смеси сточных вод [12], из которых часть наиболее ценных продуктов удалена предварительно на локальных установках.

Обессоливание и умягчение воды методами ионного обмена также по существу является одним из видов сорбционной технологии и в соответствии с этим при использовании ионообменных процессов необходимо решать задачу целесообразного применения извлеченных из воды концентратов солей и отработанных реагентов. Соблюдение этого общего условия является обязательным в любом замкнутом цикле водоснабжения, основанном на возврате сточных вод в производство, независимо от того, какие физико-химические или химические процессы используются на отдельных этапах водоподготовки.

Ниже рассмотрены перспективы использования сточных вод с минерализацией не более 3 кг/м³ для водоснабжения предприятий, для которых задача безотходного получения технической воды необходимого качества может быть экономично решена при использовании сорбционных процессов — сорбции органических загрязнений и ионообменного обессоливания.

УДАЛЕНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ, КОЛЛОИДНЫХ И ПОЛУКОЛЛОИДНЫХ ПРИМЕСЕЙ ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

1. УДАЛЕНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОСАЖДЕНИЕМ

Сточные воды многих химических производств представляют собой гетерогенные системы, в которых размер взвешенных в воде частиц может изменяться в широких пределах от 10—50 до 0,001—0,1 мкм. В большинстве случаев дисперсные системы сточных вод являются лиофобными.

Эффективность удаления взвешенных веществ из сточных вод методом осаждения определяется степенью устойчивости таких дисперсных систем. Агрегативно устойчивыми являются обычно высокодисперсные примеси и коллоидные загрязнения, концентрация которых в природных и сточных водах не превышает 1%. Размеры частиц в таких взвесьях не изменяются в течение длительного времени. Агрегативно устойчивые взвеси являются также и седиментационно устойчивыми, т. е. не осаждаются в течение длительного времени, и распределение их концентрации по высоте слоя жидкости остается более или менее равномерным [1]. Очевидно, что максимальный размер седиментационно устойчивой частицы будет тем меньше, чем выше ее плотность, так как на взвешенную в воде частицу действует сила R_0 , равная

$$R_0 = W(\rho_r - \rho_{ж})g \quad (II-1)$$

где W — объем частицы; ρ_r и $\rho_{ж}$ — соответственно плотности твердого вещества частицы и жидкости (природной или сточной воды) при данной температуре; g — ускорение свободного падения.

Если результат действия этих сил больше нуля, то частица осаждается, и такая взвесь является седиментационно неустойчивой. Нарушение седиментационной устойчивости может быть вызвано изотермической перекристаллизацией, при которой крупные частицы растут за счет растворения мелких, в результате чего их масса увеличивается настолько, что они начинают оседать [2].

Для описания процесса осаждения взвесей предложено несколько количественных закономерностей; наиболее простой является формула Стокса. Движущаяся в реальной жидкости частица шарообразной формы испытывает сопротивление, сила которого R_c равна

$$R_c = 3\pi\mu v \quad (II-2)$$

где μ — вязкость среды; v — скорость движения частицы, которая может быть определена из условия равенства вертикальной результирующей силы R_0 и силы сопротивления

$$v = \frac{d^2}{18\mu} g (\rho_r - \rho_{ж}) \quad (II-3)$$

d — диаметр частицы; ρ_r и $\rho_{ж}$ — плотность соответственно вещества дисперсной фазы и воды.