

9. Патент РФ №2365676. Электролит для осаждения черных антикоррозионных оксидных покрытий на сталь. 27.08.2009. Бюл. №24.
10. Руденко М. Ф., Шипулина Ю. В. Гелиоэнергетические термотрансформаторы «сухой» абсорбции циклического действия: монография. Астрахань : АГТУ, 2013. 172 с.
11. Патент РФ № 2315923. Гелиоэнергетический холодильник. 27.01.2008. Бюл. № 3.
12. Патент РФ № 3137991. Генератор –адсорбер гелиохолодильника. 20.09.99. Бюл. № 26.
13. Патент РФ № 2263859. Реактор генератора-адсорбера гелиохолодильной установки (варианты). 10.11.2005. Бюл. № 31.
14. Каримов М. Ш., Руденко М. Ф., Шипулина Ю. В. Повышение эффективности гелиоэнергетического адсорбционного термотрансформатора // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 3. С. 31–35.
15. Кульбаракова М. Б., Пискунов Н. С., Шипулина Ю. В., Руденко М. Ф. Тенденции развития гелиоэнергетической техники: термотрансформаторы «сухой» абсорбции для систем природообустройства // Вестник АГТУ. 2017. № 1 (63). С. 15–22.

© А. М. Руденко, Ю. В. Шипулина, М. Ф. Руденко, Л. П. Третьяк

**Ссылка для цитирования:**

Руденко А. М., Шипулина Ю. В., Руденко М. Ф., Третьяк Л. П. Альтернативную энергетику в развитие современных южных городов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2018. № 2 (28). С. 14–17.

УДК 628.3

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ

**Л. В. Боронина**

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет*

Методы современных технологий очистки воды основаны на различии физико-химических параметров разделяемых компонентов (температуры, растворимостей и т.п.) и используют явление фазовых превращений. Гидродинамические процессы, происходящие в системах водоподготовки и водоочистки разнообразны и подвержены влиянию многих факторов. Их учёт, управление при эксплуатации становится весьма сложной проблемой. Это объясняется сложностью технологических процессов эксплуатации соответствующих систем. Подробное математическое описание и изучение этих процессов из-за влияния множества постоянных, переменных и случайных факторов и отсутствия необходимой исходной информации не всегда представляется возможным. Поэтому необходимо привлекать к рассмотрению и изучению процессов эксплуатации и управления системами для водоподготовки и водоочистки воды современные методы анализа сложных систем, основанные на оптимизации.

**Ключевые слова:** оптимизация, предварительная очистка воды, гидродинамические процессы, физико-химические параметры.

## OPTIMIZATION OF OPERATION AND MANAGEMENT PROCESSES OF WATER PRELIMINARY TREATMENT SYSTEMS

**L. V. Boronina**

*Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering*

The methods of modern water purification technologies are based on the difference in the physicochemical parameters of the components being separated (temperature, solubilities, etc.) and use the phenomenon of phase transformations. Hydrodynamic processes in water treatment and purification systems are diverse and influenced by many factors. Their accounting, management during the operation becomes a very complex problem. This is due to the complexity of the technological processes of the respective systems operation. Detailed mathematical description and study of these processes are not always possible due to the influence of a variety of constant, variable and random factors, and the lack of necessary background information. Therefore, it is necessary to involve modern methods of analyzing complex systems, based on the optimization of the processes of operation and management of water treatment systems and water purification for consideration and study.

**Keywords:** optimization, water preliminary treatment, hydrodynamic processes, physical and chemical parameters.

Применение методов оптимизации процессов эксплуатации и управления системами предварительной очистки воды позволяет повысить качество функционирования рассматриваемых систем, улучшить их технико-экономические показатели.

На водозаборных узлах систем водоснабжения очистка природных вод от наносов, содержащих минеральную взвесь с плотностью больше плотности воды является серьезной проблемой [1, 2]. Наличие в воде таких загрязнений влечёт за собой усложнение схемы последующей водоочистки, удорожание эксплуатационных расходов.

Одним из наиболее эффективных методов предварительной очистки воды является центрифугирование, которое используют для выделения составляющих фаз из двухкомпонентных

(суспензии, эмульсии) и трёхкомпонентных (эмульсии, содержащие твердую фазу) систем [3].

По сравнению с другими методами разделения (отстаивание, фильтрование) центрифугирование позволяет получать осадки с меньшей влажностью. В результате применения центрифугирования достигается простота, экономичность и управляемость процесса очистки воды, а также значительно сокращается количество технологического оборудования в схеме обработки воды. Однако при относительно малых объёмах аппаратуры; её энергоёмкость высока.

При центробежном осаждении в отличие от фильтрования удаётся разделять суспензии с тонкодисперсной твердой фазой, минимальный размер частиц которой составляет 5–10 мкм. Центрифугирование характеризуется рядом тех-



нологических параметров, определяющих качество процесса и его кинетику. К ним относится фактор разделения, который определяется по формуле (1) [4]:

$$fr = \omega_{рт}^2 r_{рт}, \quad (1)$$

где  $r_{рт}$  – максимальный внутренний радиус ротора, м;  $\omega_{рт}$  – скорость вращения ротора центрифуги,  $c^{-1}$ , отражающий интенсивность центробежного поля; скорость центрифугирования – производительность центробежной машины по исходной жидкой системе или составляющим её компонентам; унос – содержание твёрдой фазы в фугате (фильтрате); насыщенность осадка жидкой фазой (в том числе влажность осадка) после центрифугирования; крупность разделения – минимальный размер частиц, улавливаемых при центробежном осаждении.

Кинетика центрифугирования зависит от физико-химических свойств разделяемой системы (разность плотностей фаз, гранулометрический состав твёрдой фазы, вязкость жидкой фазы, удельное сопротивление осадка при фильтровании) и факторов, обусловленных конструкцией и частотой вращения ротора центробежной машины (структура внутриворотного потока, его гидродинамика и поле скоростей). Математическое описание потока даётся уравнениями Навье – Стокса и неразрывности, которые составляются с учётом геометрии ротора и граничных условий [5, 6].

При центробежном осаждении движение твёрдых частиц происходит под действием центробежной силы  $\frac{1}{6}\pi d^3 \Delta \rho \omega_{рт}^2 r$  ( $d$  – диаметр частицы;  $\Delta \rho$  – разность плотностей твёрдой и жидкой фаз;  $r$  – расстояние от частицы до оси вращения ротора) и силы сопротивления жидкой среды  $S$ .

Соотношение этих сил определяет скорость осаждения  $\omega$ . При ламинарном режиме, характерном для осветления, сила  $S$  выражается законом Стокса (2):

$$S = 0,25 \xi \pi d^2 \rho_{ж} \omega^{-2}, \quad (2)$$

и

$$\omega = (\Delta \rho d^2 \omega_{рт}^2 r / 18 \mu), \quad (3)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкой фазы. Для турбулентного режима при осаждении крупных частиц высококонцентрированных суспензий сила  $S$  находится из уравнения (4):

$$S = 0,25 \xi \pi d^2 \rho_{ж} \omega_{ст}^{-2}, \quad (4)$$

где  $\xi$  – коэффициент лобового сопротивления;

$\rho_{жс}$  – плотность жидкой фазы,  $кг / м^3$ .

Гидродинамика потока определяет время пребывания частиц в роторе и время осаждения;

сопоставление этих величин позволяет найти крупность разделения [3–5].

В работе моделирование процесса центрифугирования основывается на исследовании поведения твёрдых включений в воде, силовом поле центрифуги. Исследование проводилось на воде, содержащей частицы железа радиусом  $R$  от  $0,8 \cdot 10^{-6}$  м до  $4,5 \cdot 10^{-6}$  м при температуре  $T$  10, 15, 20 и 27 °С для определения зависимости между диаметром частицы железа, температурой воды и скоростью, с которой частица переместится от центра к стенке центрифуги. Скорость движения частиц, согласно теории диффузионного движения включений [1], определяется по формуле (5):

$$v = \frac{3 \cdot D \cdot \Omega \cdot F}{2\pi \cdot k \cdot T \cdot R^3}, \quad м / с, \quad (5)$$

где  $\Omega$  – атомный объём железа,  $м^3$ ;  $D$  – коэффициент диффузии для тяжёлой воды при  $T = 25$  °С равен  $2,5 \cdot 10^{-9}$   $м^2 / с$ ;  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж / град;  $T$  – температура воды, К;  $F$  – внешняя сила.

Внешнюю силу  $F$  определяют из выражения (6):

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot R = m \cdot (2\pi v)^2 R^1, \quad Н, \quad (6)$$

где  $v$  – частота вращения, об / с;  $R^1$  – радиус ротора центрифуги, м;  $\omega$  – угловая скорость, рад / с;  $m$  – масса частицы железа, равная  $33,075 \cdot 10^{-15}$  кг,  $\Omega$  – атомный объём, определяется по формуле (7):

$$\Omega = \frac{\mu}{N_A \cdot \rho}, \quad м^3, \quad (7)$$

где  $\mu$  – молярная масса;  $\rho$  – плотность железа,  $7900$  кг /  $м^3$ ;  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $6,02 \cdot 10^{-23}$  моль $^{-1}$ .

Результаты расчётов движения частиц при центрифугировании воды приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики движения частиц

Радиус частицы, м	Скорость движения частицы, $10^{13}$ м/с			
	При $T = 283$ К	При $T = 288$ К	При $T = 293$ К	При $T = 300$ К
$0,8 \cdot 10^{-6}$	17,75864	17,45033	17,15254	16,7518
$0,9 \cdot 10^{-6}$	12,47246	12,25593	12,04678	11,76533
$1 \cdot 10^{-6}$	9,092424	8,93457	8,782103	8,576923
$1,3 \cdot 10^{-6}$	4,138564	4,066714	3,997316	3,903925
$1,5 \cdot 10^{-6}$	2,694052	2,64728	2,602105	2,541311
$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,559058	1,531991	1,505848	1,470666
$2,0 \cdot 10^{-6}$	1,136553	1,116821	1,097763	1,072115
$2,3 \cdot 10^{-6}$	0,747302	0,734328	0,721797	0,704933
$2,5 \cdot 10^{-6}$	0,581915	0,571812	0,562055	0,548923
$3,0 \cdot 10^{-6}$	0,336756	0,33091	0,325263	0,317664
$3,5 \cdot 10^{-6}$	0,212068	0,208386	0,20483	0,200045
$4,5 \cdot 10^{-6}$	0,09978	0,098047	0,096374	0,094123

На основании данных таблицы 1 в программе MathCad были построены зависимости скорости частицы от температуры воды  $v = f(T)$  и скорости от размера частиц  $v = f(R)$  (рис. 1, 2).

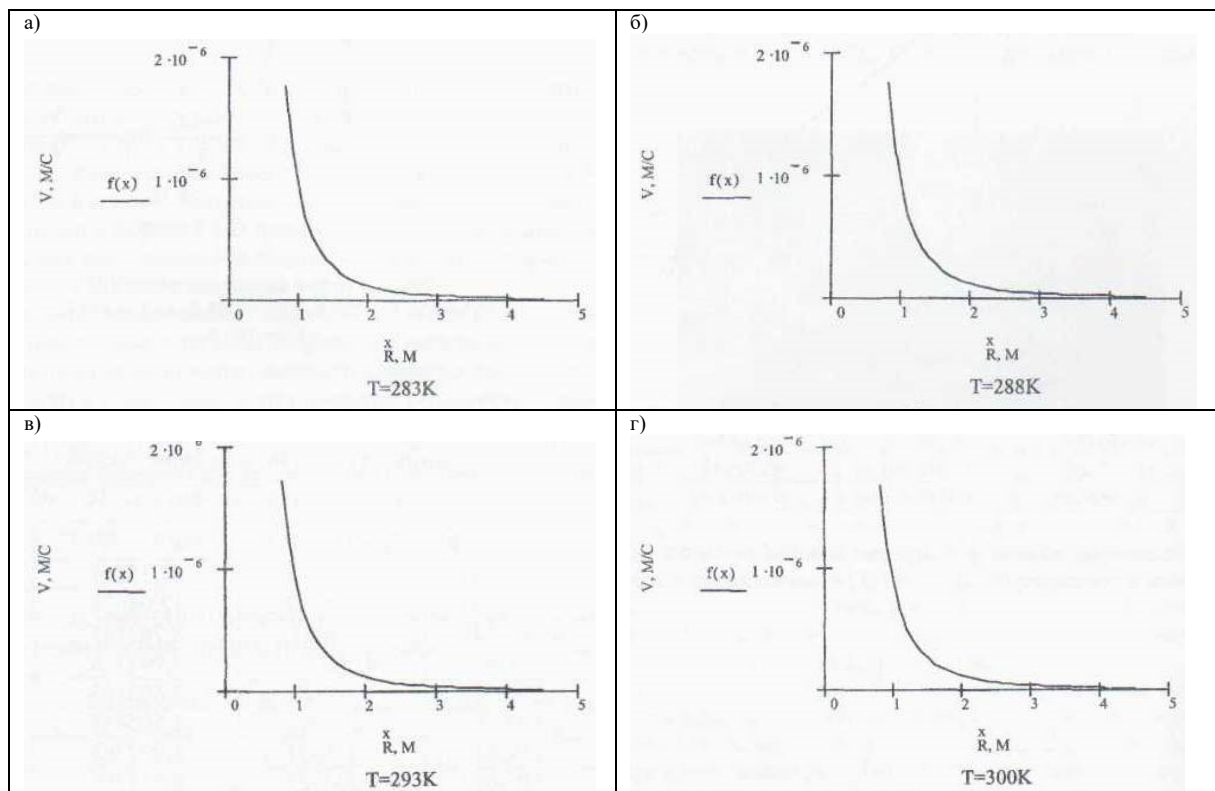


Рис. 1. График зависимости  $v = f(R)$ :  
а)  $T=288K$ ; б)  $T=288K$ ; в)  $T=293K$ ; г)  $T=300K$

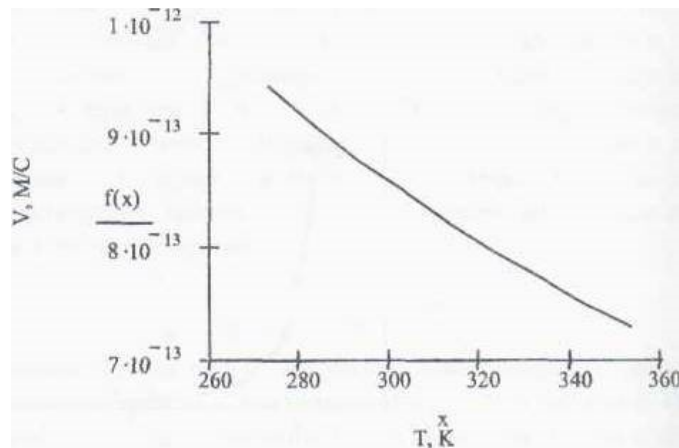


Рис. 2. График зависимости  $v = f(T)$

Анализ графиков, представленных на рисунках 1, 2, показал, что зависимость скорости миграции частицы от её радиуса гиперболическая. При увеличении радиуса частицы  $R$  скорость миграции  $v$  уменьшается.

При представлении результатов графиков (рис. 1, 2) в 3-D виде  $v = \ln f(T, R)$  видно, что зависимость скорости миграции частицы от температуры воды обратно пропорциональная. В диапазоне температуры  $+10 \dots +27 \text{ }^\circ\text{C}$  с увеличением температуры воды  $T$  скорость миграции  $v$  частицы уменьшается.

Для наглядного изображения процесса движения частицы в воде удобнее рассматривать контурный график. Например, при использова-

нии математического пакета MathCad достаточно в формате 3-D графика в закладке «Общий» изменить на контурный график, а для проставления нумерации необходимо открыть закладку «Специальный» и изменить свойства контура.

На рисунке 4 наглядно представлена зависимость  $v = \ln f(T, R)$  в виде карты. Задав значение  $T$  и исходный размер частицы  $R$ , проводим перпендикуляры из этих точек и на их пересечении получаем значение скорости миграции частицы  $v$ . Для определения скорости частицы  $v$  необходимо задать значение температуры воды  $T$  и размер частицы  $R$ . Например (рис. 4), при температуре воды  $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $288 \text{ K}$ ), а размере частицы  $R = 0,8 \cdot 10^{-6}$  скорость миграции частицы в равна  $v = 6,1510^{18} \text{ м/с}$ .

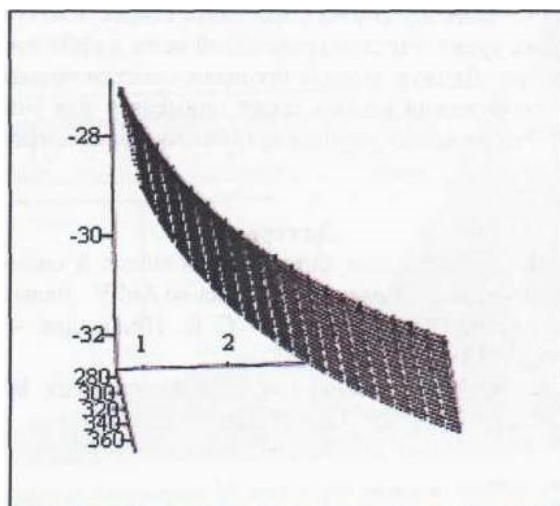


Рис. 3. График зависимости скорости миграции частиц от температуры воды и радиуса частицы

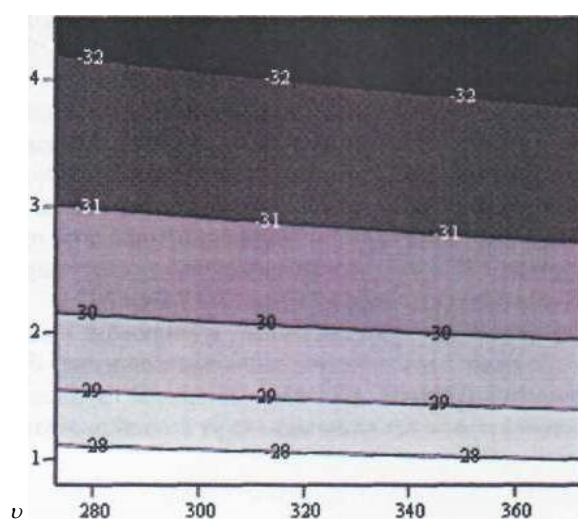


Рис. 4. Карта зависимости скорости миграции частиц от температуры воды и радиуса частицы

Анализ проведённых исследований показывает, что, пользуясь картой зависимости скорости миграции частиц от температуры воды и радиуса частицы, построенной в MathCad, можно определять скорость миграции, а значит и контролировать время очистки воды в зависимости от температуры воды и радиуса частиц,

необходимость и количество реагентов для интенсификации процесса очистки воды.

Данную модель процесса очистки воды можно применять для очистки всех видов вод и обработки осадка. Это позволит значительно оптимизировать процесс эксплуатации и управления системами предварительной очистки воды.

#### Список литературы

1. Боронина Л. В., Медведев А. А. Концепция сохранения и предотвращения загрязнения реки Волги (на примере Астраханской области) // Яковлевские чтения : сб. докл. XIV Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева и 90-летию со дня создания факультета «ВиВ». 2019. С. 5–8.
2. Боронина Л.В., Садчиков П.Н., Тажиева С.З., Москвичева Е.В. Исследование сезонной динамики загрязненности поверхностных вод нижневолжского бассейна // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 4. с. 419.
3. Kuzin M. A. Simulation and Vibrational Reliability of Centrifuge for Separating Suspensions // Russian Engineering Research ISSN 1068-798X. Allerton Press, Inc., 2009. Vol. 29, No. 11, p. 1099–1101. DOI: 10.3103/S1068798X09110069.
4. Штеренлихт Д. В. Гидравлика. М. : Лань, 2015. 656 с.
5. Поникаров С. И., Булкин В. А., Перелыгин О. А. Интенсификация технологических процессов использованием центробежного поля // Вестник Казанского технологического университета. 1998. № 1. С. 96.
6. Жужиков В. А. Фильтрация: Теория и практика разделения суспензий. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Химия, 1980. 400 с.

© Л. В. Боронина

#### Ссылка для цитирования:

Боронина Л. В. Оптимизация процессов эксплуатации и управления системами предварительной очистки воды // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2019. № 4 (28). С. 17–20.