

УДК 532.528

Features of Influence of Cavitation Effects on the Physicochemical Properties of Water and Wastewater

Vladimir A. Kulagin^{*a}, Ekaterina S. Sapoghnikova^a,
Olesya P. Stebeleva^a, Ludmila V. Kashkina^a,
Zhi-Ying Zheng^b, Qian Li^b and Feng-Chen Li^b

^aSiberian Federal University

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

^bSchool of Energy Science and Engineering

Harbin Institute of Technology

92 West Dachi, Nangang District, Harbin, 150001, China

Received 10.04.2014, received in revised form 21.05.2014, accepted 03.08.2014

The results of studies of distilled and tap water after exposure to hydrodynamic cavitation at different time regimes. The changes of the temperature, conductivity, pH value, redox potential, oxygen content depending on the exposure time of cavitation. Rational set duration cavitation treatment for activated water. The experimental results showed the possibility of using technology to treat wastewater.

Keywords: cavitation technology, activated water, sewage, supercavitation, physico-chemical characteristics of water.

Введение

Вода играет уникальную роль в существовании всего живого на Земле. Начиная с 1991 г. ежегодно по инициативе Стокгольмского международного института воды (Швеция) проводится Всемирная неделя воды. В резолюции этого мероприятия, проведенного в августе 2011 г., предложено обратить особое внимание на поиск высокотехнологичных решений водоочистки и водоподготовки для достижения требуемых стандартов качества воды, поскольку проблема обеспечения населения чистой пресной водой становится все более актуальной.

В настоящее время достаточно широкое распространение получили устройства для высокопроизводительной очистки воды от любых видов загрязнений на базе гидродинамических генераторов. Использование кавитационных генераторов для эффективной очистки воды – это новая перспективная, энергетически малозатратная, безотходная кавитационная технология [1]. Во многих исследованиях последних лет показана ее эффективность [2, 3]. На выходе таких устройств получают чистую, обеззараженную воду.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: v.a.kulagin@mail.ru

В процессе работы гидродинамических генераторов в воде возникают высокоэнергетические эффекты (холодное кипение или кавитация), которые не только способствуют эффективной очистке воды, но приводят к изменению ее структуры, усилению физико-химической и биологической активности. В этой связи тщательные исследования свойств получаемой «активированной» воды, несомненно, необходимы, поскольку вода является простым, но во многих отношениях малоизученным веществом. Немаловажным представляется установление оптимальных режимов работы гидродинамического генератора для получения активированной воды.

Задачи и методы исследования

Ряд работ указывают на выгодность применения гидродинамической обработки в качестве альтернативного безреагентного метода очистки различных стоков. Применение гидродинамического генератора не только малозатратный, но и эффективный способ очистки на заключительном этапе технологической схемы очистных сооружений [3-6].

В настоящей работе на примере водопроводной и дистиллированной воды была исследована динамика изменения ее физико-химических характеристик в зависимости от различных факторов: режимов гидродинамической обработки, времени отстаивания, начальных параметров: водородного показателя pH, окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), удельной электропроводности S , концентрации растворенного кислорода (КРК). Кроме того, было выяснено время релаксации полученных после обработки параметров воды и установлены новые значения. Результаты позволяют использовать гидродинамический кавитатор с определенными режимами обработки для получения воды с конкретными характеристиками.

Обработка воды производилась в кавитационном реакторе роторного типа с мощностью электродвигателя 1 кВт; объемом рабочей камеры $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; с числом кавитации $\chi = 0,05$. Специально спроектированный блок питания электропривода позволяет плавно изменять число оборотов ротора в диапазоне $0-15 \cdot 10^3$ об/мин. Обработка воды объемом 1 л проходила с помощью суперкавитационного стенда со следующими параметрами: мощность электродвигателя 4 кВт, объем рабочей камеры $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; скорость вращения четырехлопастного клиновидного кавитатора 2880 об/мин с числом кавитации $\chi = 0,01$.

Результаты и их обсуждение

Физико-химические параметры дистиллированной и водопроводной воды

Для чистоты исследования влияния кавитационного воздействия на свойства воды были определены ее начальные параметры: ОВП, электропроводность и pH. Выяснено, что и у дистиллированной воды после ее получения, и у водопроводной после ее набора происходят флуктуации этих параметров. Для исследований воздействия кавитационной обработки необходимо использовать стабилизированную воду, так как колебания значений ОВП, электропроводности и pH могут привести к неоднозначным результатам. В работах [7-8] также сообщается о влиянии «возраста» воды (время после получения дистиллята, или отстоя водопроводной воды) на качественные показатели электропроводности при воздействии постоянного магнитного поля, электромагнитного поля и механических колебаний.

На рисунке 1а,в представлены результаты измерений ОВП, электропроводности и pH дистиллированной воды в течение шести суток после ее получения; на рис. 1г,е – результаты измерений водопроводной воды в течение пяти суток после ее получения. Методом регрессионного анализа были определены уравнения зависимости этих параметров от времени. Из представ-

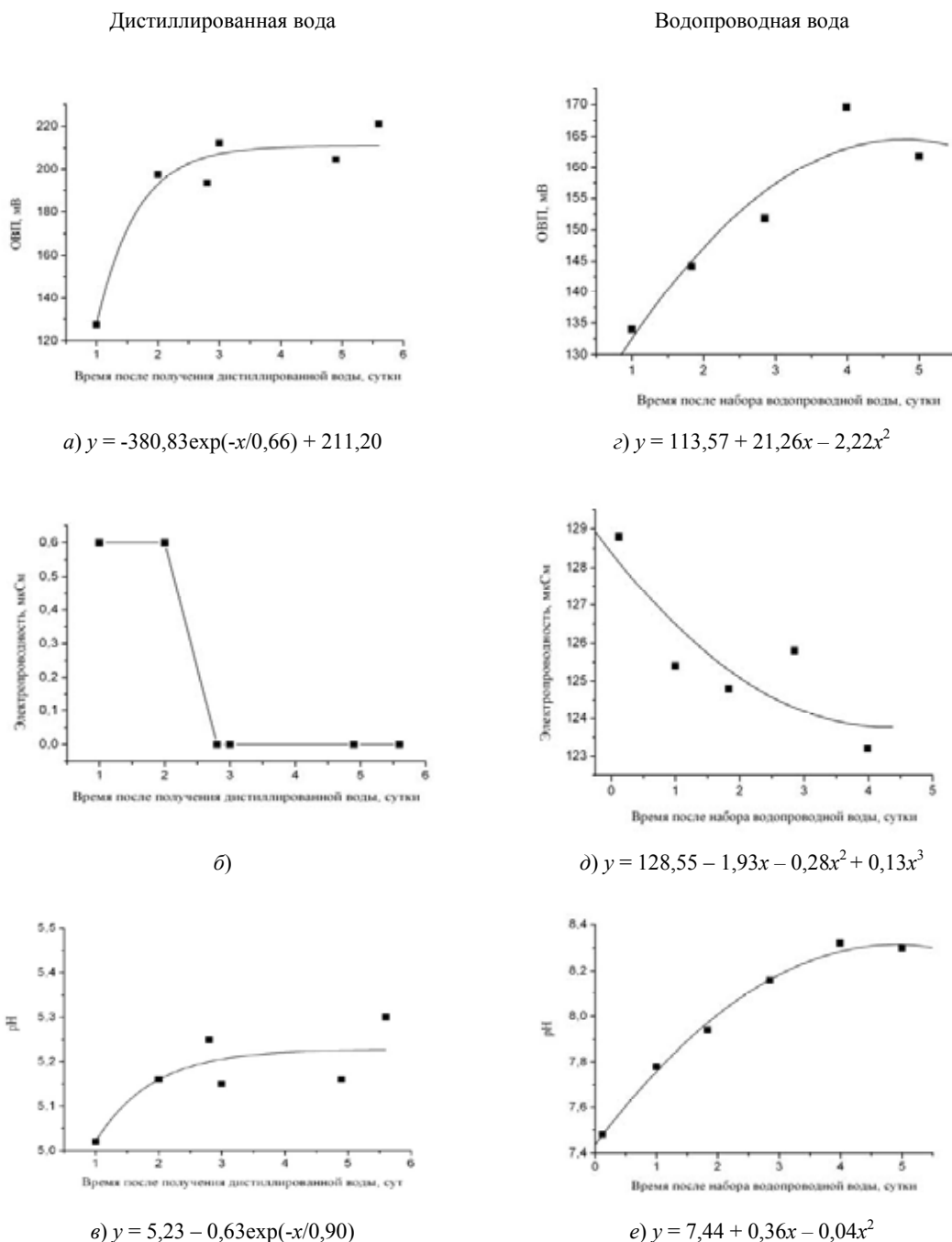


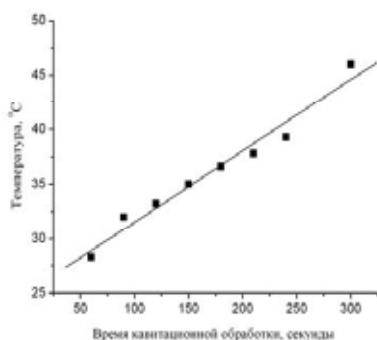
Рис. 1. Изменение физико-химических параметров дистиллированной воды в течение шести суток после ее получения и водопроводной воды в течение пяти суток после ее набора

ленных графиков видно, что в первые четыре дня происходят флуктуации значений, затем вода принимает более стабильное (уравновешенное) состояние.

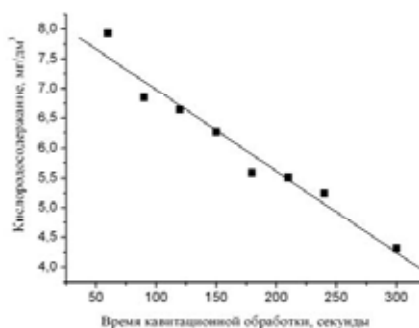
Таким образом, для исследований влияния кавитации на физико-химические свойства воды необходимо учитывать «возраст» воды, т.е. в данном случае использовать дистиллированную воду на четвертые сутки после ее получения, а водопроводную – на пятые сутки после ее набора.

Физико-химические параметры кавитационно-активированной дистиллированной воды

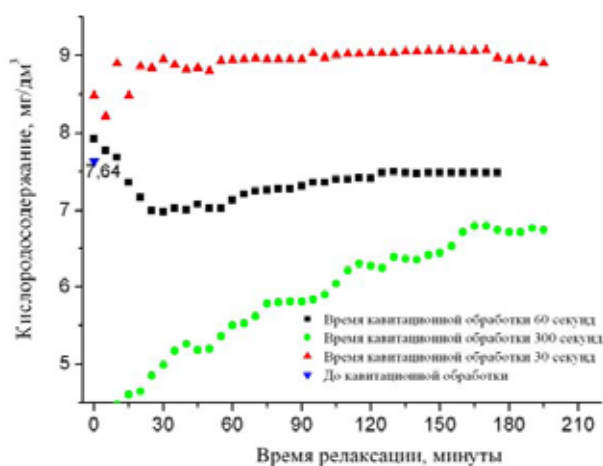
В работах [2, 3] было установлено, что оптимальные параметры обработки дистиллированной воды соответствуют числам кавитации $\chi = 0,05$. Поэтому в опытах обработка производилась в режиме суперкавитации ($\chi = 0,05$) при постоянной частоте вращения ротора $n = 10\ 000$ об/мин. Обрабатываемый объем воды был равен 100 мл. На рисунках 2 и 3 представлены результаты измерений в виде графических зависимостей физико-химических свойств дистиллированной воды от времени кавитационной обработки.



a) $y = 24,99 + 0,04x$



б) $y = 8,35 - 0,01x$



в)

Рис. 2. Изменение КРК дистиллированной воды в зависимости от времени кавитационной обработки и времени релаксации

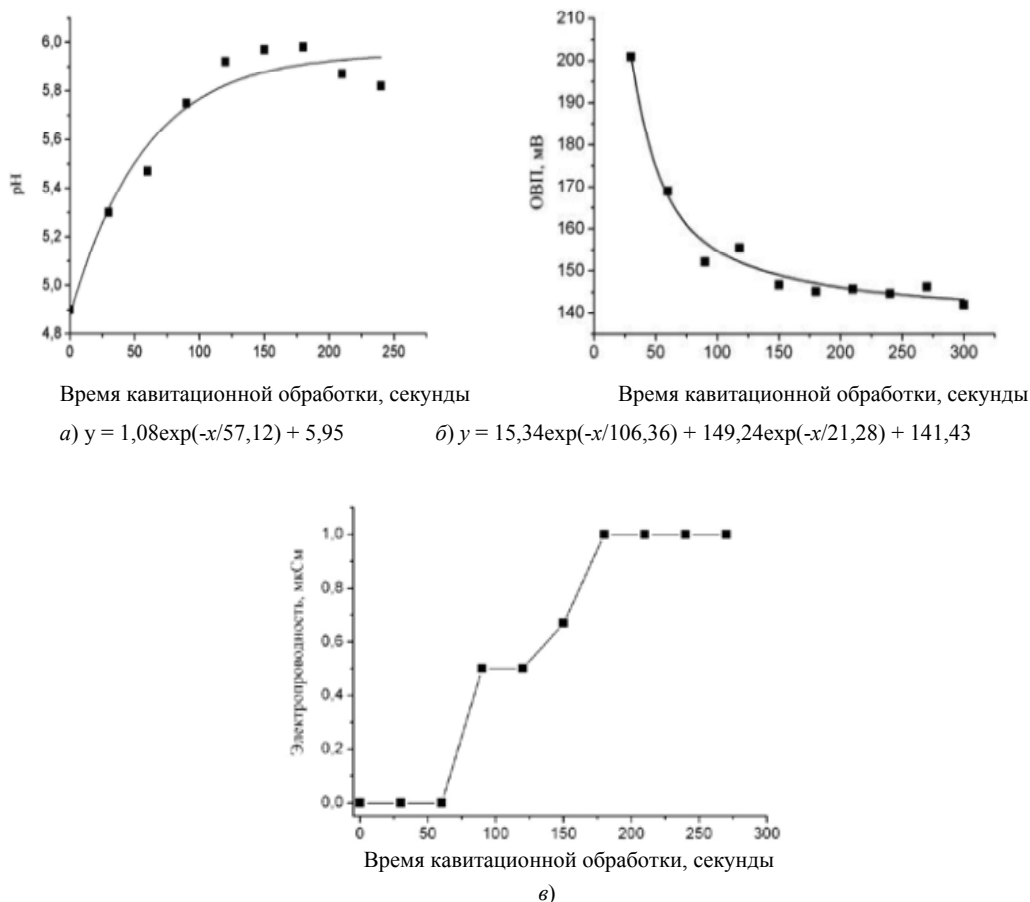


Рис. 3. Изменение физико-химических параметров дистиллированной воды в зависимости от времени кавитационной обработки

При кавитации с увеличением времени обработки наблюдается повышение температуры воды более чем на 40 %. Это связано с пульсацией и последующим коллапсом кавитационных пузырьков [1, 2]. Зависимость температуры от времени обработки линейная, интенсивность изменения температуры характеризуется тангенсом угла наклона прямой $\operatorname{tg}\alpha = 0,04$ (рис. 2а). Полученные экспериментальные данные также хорошо согласуются с результатами работы [2, 3].

Экспериментальная зависимость изменения КРК воды от времени кавитационного воздействия представлена на рис. 2б. Каждая точка построена по усредненному значению пяти измерений. Относительная ошибка определения КРК – 2,5 %. Концентрация кислорода в воде линейно уменьшается при увеличении времени воздействия кавитации. Интенсивность изменения КРК характеризуется тангенсом угла наклона прямой $\operatorname{tg}\alpha = 0,01$.

Измерения значений КРК активированной воды в течение ~ 200 мин с шагом в 5 мин на образцах со временем обработки 30, 60, 90 и 300 с показали, что повышение значений КРК до значений? близких к значениям дистиллированной воды, наблюдалось в течение первых 100 мин, но и при 200 мин не достигло исходного значения КРК (рис. 2в).

На рисунке 3а представлена зависимость рН от времени обработки. Водородный показатель рН увеличивается с увеличением времени кавитационного воздействия. При времени обработки 180 с разница между максимальным значением рН активированной воды и рН исходного дистиллята ($\Delta\text{pH}_{\text{max}}$) составила 1,1. Наиболее интенсивное изменение рН соответствует интервалу 3090 с. В этом диапазоне рН повышается на 15 %, тогда как максимальное повышение рН составляет 18 %. Скорость изменения рН при кавитационном воздействии в диапазоне 3090 с почти в два раза превышает скорость изменения рН при воздействии в диапазоне 90 300 с.

После кавитационного воздействия проводились измерения значений рН активированной воды в течение ~ 200 мин с шагом в 5 мин на образцах со временем обработки 30, 60, 90 и 300 с. В течение этого времени показатели рН для всех образцов не вернулись к первоначальному значению.

Динамика поведения ОВП в процессе кавитационной обработки воды представлена на рис. 4в. Относительная ошибка определения ОВП – 2 %. На графике наблюдается участок наиболее интенсивного изменения ОВП в интервале 3090 с. ОВП понижается на 43 %, тогда как максимальное понижение ОВП составляет 47 %, но не принимает отрицательных значений. Скорость изменения ОВП при кавитационном воздействии в диапазоне 3090 с почти в три раза

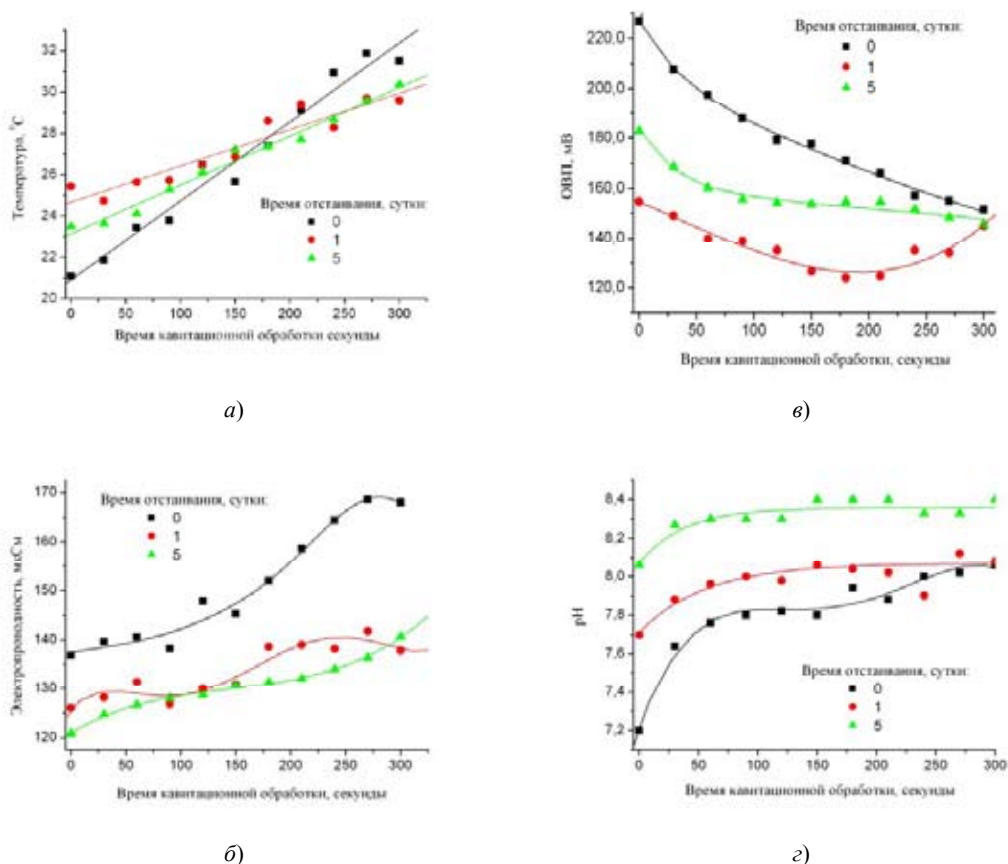


Рис. 4. Зависимости физико-химических параметров водопроводной воды неотстоявшейся и отстоявшейся в течение 1 и 5 сут от времени кавитационной обработки

превышает скорость изменения ОВП при воздействии в диапазоне 90 300 с. Следует отметить, что в работе [9] при воздействии ультразвуком на воду обнаружено, что оптимальное изменение рН воды наблюдается при обработке в течение 1 мин. Проводились измерения значений ОВП активированной воды в течение ~ 200 мин с шагом в 5 мин на образцах со временем обработки 30, 60, 90 и 300 с. Повышение ОВП до значений близких к значениям дистиллированной воды наблюдалось в первые 40 мин.

В серии экспериментов по выявлению воздействия на дистиллированную воду кавитационных эффектов различной продолжительности (30 300 с) было установлено повышение электропроводности (рис. 3в). Значение электропроводности исходного дистиллята составляло 0 мкОм⁻¹/см, что связано с низкой чувствительностью прибора. Электропроводность активированной воды в течение ~ 200 мин с шагом в 5 мин на образцах со временем обработки 30, 60 и 90 с не изменялась и оставалась равной 1 мкОм⁻¹/см [10].

Физико-химические параметры кавитационно-активированной водопроводной воды

Исследования физико-химических параметров водопроводной воды проводили аналогично исследованиям для дистиллированной воды: число кавитации $\chi = 0,05$; частота вращения ротора $n = 10\ 000$ об/мин; обрабатываемый объем воды составлял 100 мл. В эксперименте была использована водопроводная вода с различным временем отстаивания (время после ее набора): 0, 1 и 5 сут. Результаты экспериментов представлены графически на рис. 4, а уравнения регрессии приведены в табл. 1.

При кавитации с увеличением времени обработки наблюдается повышение температуры воды примерно на 30 % для трех образцов (рис. 4а). Зависимости температур от времени обработки линейные, по мере увеличения времени отстаивания воды интенсивность изменения температур уменьшается: $\text{tga} = 0,020,04$. Из графических зависимостей можно выделить общую точку для трех прямых при кавитационном воздействии на воду в течение 180 с.

Значение электропроводности воды при кавитационной обработке увеличивалось при увеличении времени действия кавитации и времени отстаивания. Наиболее интенсивное изменение электропроводности наблюдалось для неотстоявшейся воды (рис. 4б).

Таблица 1. Уравнения полиномов, аппроксимирующие зависимости физико-химических параметров активированной водопроводной воды неотстоявшейся и отстоявшейся в течение 1 и 5 сут

Уравнения регрессии	Время отстаивания, сутки		
	0	1	5
T	$y = 20,91 + 0,04x$	$y = 24,67 + 0,02x$	$y = 23,13 + 0,02x$
ОВП	$y = 155,20 \exp(-x/680,85) + 20,78 \exp(-x/34,46) + 50,81$	$y = 154,66 - 0,19x - 2,98x^2 + 2,81x^3$	$y = 23,11 \exp(-x/30,31) - 994,39 \exp(x/24933,15) + 1154,38$
S	$y = 133 + 7654,22(211,92/(4(x - 280,48)x^2 + 211,92^2))$	$y = 125,70 + 0,23x - 0,004x^2 + 3,67x^3 - 1,16x^4 + 1,24x^5$	$y = 120,94 + 0,13x - 7,36x^2 + 1,69x^3$
pH	$y = 7,22 + 0,02x - 1,7x^2 + 7,10x^3 - 1,01x^4$	$y = -0,36 \exp(-x/56,90) + 8,07$	$y = -0,29 \exp(-x/37,37) + 8,36$

Динамика поведения ОВП в процессе кавитационной обработки воды представлена на рис. 4в. Относительная ошибка определения ОВП составила 35 %. На графике наблюдается участок наиболее интенсивного изменения ОВП в интервале 30 220 с для неотстоявшейся воды и 3090 с для отстоявшейся в течение 1 и 5 сут. ОВП понижается на 23,9 и 20 % соответственно, но не принимает отрицательных значений. Скорость изменения ОВП при кавитационном воздействии в диапазоне 3090 с почти в три раза превышает скорость изменения ОВП при воздействии в диапазоне 90 300 с для отстоянной воды.

На рисунке 4г показана зависимость рН от времени обработки. Водородный показатель рН увеличивается с увеличением времени кавитационного воздействия. Наиболее интенсивное изменение рН, как и в случае с дистиллированной водой, соответствует интервалу 3 090 с. В этом диапазоне рН повышается на 4 %, что совпадает с его максимальным повышением. В диапазоне 90 300 с значение рН принимает постоянное значение.

Кроме того, для водопроводной воды проведен ряд исследований параметров при другом режиме кавитации: число кавитации $\chi = 0,01$; частота вращения ротора $n = 2\,880$ об/мин; обрабатываемый объем воды составлял 1000 мл. Результаты измерений физико-химических свойств воды, отстоянной в течение одних суток, отражены на рис. 5. Также для сравнения действия кавитации при двух режимах кавитации приведены зависимости параметров воды, описанных выше. По уравнениям регрессии (табл. 2) видно, что полиномы для параметров ОВП и рН имеют подобную структуру и отличаются лишь коэффициентами. Более интенсивное изменение всех параметров наблюдалось для режима кавитации с $\chi = 0,01$.

Для режима кавитации $\chi = 0,01$ проводились измерения значений ОВП, рН и электропроводности активированной неотстоявшейся воды в течение ~ 200 мин с шагом в 5 мин и в течение 4 сут с шагом 1 сут на образцах со временем обработки 30, 60 и 150 с. При этом наблюдалось интенсивное понижение ОВП в течение 2 сут, после чего ОВП приняло постоянное значение. Значение электропроводности и рН в течение 12 сут принимает постоянное значение, но даже и через 5 сут не возвращается к исходной величине до воздействия кавитации.

Заключение

Проведено экспериментальное изучение реакции воды на гидродинамическое кавитационное воздействие при числах кавитации $\chi = 0,05$; 0,01 и числах оборотов ротора $n = 10000$ и 2880 об/мин в зависимости от времени воздействия. Выявлены изменения физико-химических свойств воды (электропроводность, водородный показатель (рН), окислительно-

Таблица 2. Уравнения полиномов, аппроксимирующие зависимости физико-химических параметров активированной водопроводной воды, отстоявшейся в течение 1 сут

Уравнения регрессии	$V = 100$ мл.; $\chi = 0,05$	$V = 1000$ мл.; $\chi = 0,01$
T	$y = 25,37 - 0,02x + 2,13x^2 + 1,77x^3 - 2,23x^4$	$y = 23,69 + 0,22x - 8,25x^2$
ОВП	$y = 154,66 - 0,19x - 2,98x^2 + 2,81x^3$	$y = 144,44 - 2,85x + 0,05x^2 - 2,07x^3$
S	$y = 125,70 + 0,23x - 0,004x^2 + 3,67x^3 - 1,16x^4 + 1,24x^5$	$y = 122,56 + 0,67x - 0,002x^2$
рН	$y = -0,36 \exp(-x/56,90) + 8,07$	$y = -0,58 \exp(-x/40,81) + 7,95$

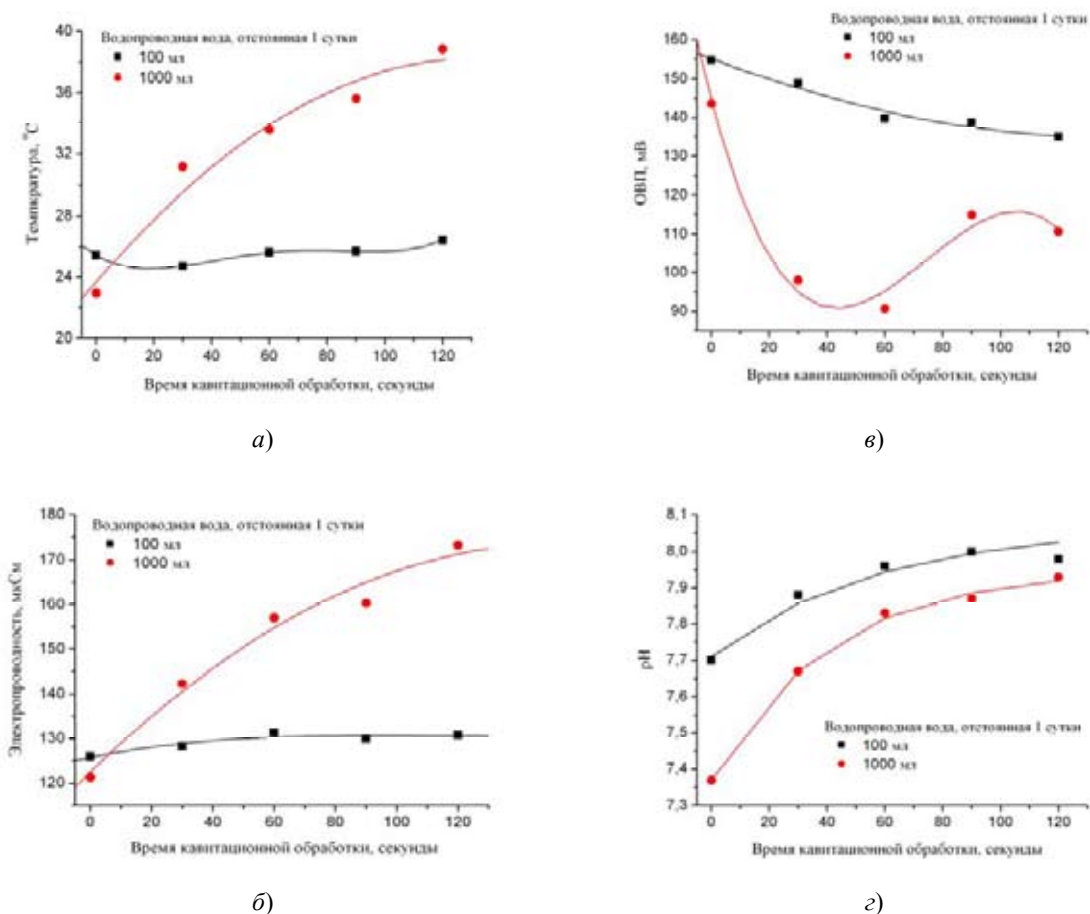


Рис. 5. Зависимости физико-химических параметров водопроводной воды, отстоявшейся в течение 1 сут, от времени кавитационной обработки и обрабатываемого объема

восстановительный потенциал, кислородосодержание и др.), установлена рациональная продолжительность кавитационной обработки воды. При этом наблюдается увеличение T , pH и электропроводности, уменьшение ОВП и КРК. Выявлен временной диапазон с наиболее интенсивным изменением pH и ОВП – 3 090 с. Скорость изменения величины pH и ОВП в интервале 3 090 с в три и два раза выше, чем в интервале 90 300 с. Эти результаты достаточно хорошо коррелируют с результатами исследования влияния ультразвука (44 кГц) на воду.

Обнаружено, что максимальное значение pH достигается при кавитационном воздействии в течение 180 с. Минимальное значение ОВП принимает при 300 с кавитационной обработки, но остается в области положительных значений.

Показано, что за время релаксации активированная вода после обработки в течение 200 мин при используемых режимах гидродинамической кавитационной обработки по всем измеряемым параметрам (T , КРК, pH, ОВП, электропроводность) не возвращается в исходное состояние.

Список литературы

- [1] *Ивченко В.М., Кулагин В.А., Немчин А.Ф.* Кавитационная технология. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. 200 с.
- [2] *Демиденко Н.Д., Кулагин В.А., Шокин Ю.И.* Моделирование и вычислительные технологии распределенных систем. Новосибирск: Наука, 2012. 424 с.
- [3] *Dubrovskaja O.G., Yevstigneev V.V., Kulagin V.A.* // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 6 (2013 6) 680–689;
- [4] *Кулагин В.А., Евстигнеев В.В.* // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. 2009. Т. 14. № 6. С. 242–245.
- [5] *Дубровская О.Г., Кулагин В.А.* // Вестник КрасГАУ. 2007. № 2 (17). С. 146–153.
- [6] *Дубровская О.Г., Евстигнеев В.В., Кулагин В.А.* // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 3. С. 26–30.
- [7] *Степанян Р.С., Айрапетян Г.С., Аракелян А.Г. и др.* // Биофизика. 1999. Т. 44. Вып. 2. С. 197–202.
- [8] *Дерпгольц В.Ф.* Мир воды. Л.: Недра, 1979. 254 с.
- [9] *Букатый В.И., Нестерюк П.И.* // Ползуновский вестник. 2010. № 2. С. 60–65.
- [10] *Стебелева О.П., Сапожникова Е.С., Криволицкий А.С.* // Вестник ассоциации выпускников КГТУ. Красноярск: ПИК «Офсет», 2011. С. 78–83.

Особенности влияния эффектов кавитации на физико-химические свойства воды и стоков

**В.А. Кулагин^а, Е.С. Сапожникова^а,
О.П. Стебелева^а, Л.В. Кашкина^а,
Чжи-Ин Чжэн^б, Цянь Ли^б, Фэн-Чэнь Ли^б**
*^аСибирский федеральный университет,
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79
^бШкола энергетических наук и техники
Харбинский технологический институт
Китай, 150001, Харбин*

Представлены результаты исследований дистиллированной и водопроводной воды после воздействия гидродинамической кавитации при различных временных режимах. Выявлены изменения температуры, электропроводности, водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала, кислородосодержания в зависимости от времени воздействия кавитации. Установлена рациональная продолжительность кавитационной обработки для получения активированной воды. Результаты экспериментов показали возможность использования технологии для очистки сточных вод.

Ключевые слова: кавитационная технология, активированная вода, стоки, суперкавитация, физико-химические характеристики воды.
