

УДК 628.3

## СВЧ-обработка осадков сточных вод пищевых производств

И.А. Гапоненков, О.А. Фёдорова

Политехнический институт МГТУ, кафедра экологии  
и защиты окружающей среды

**Аннотация.** В лабораторных условиях изучено влияние микроволнового излучения на осадки сточных вод пищевых производств. Показана зависимость некоторых физических параметров осадков сточных вод от времени обработки СВЧ-волнами.

**Abstract.** Influence of microwave radiation upon wastewater sludge of food production has been studied in laboratory experiments. The dependence of some physical sludge parameters on microwave radiation processing time has been shown.

**Ключевые слова:** обработка осадков сточных вод, активный ил, обезвоживаемость, микроволновое излучение  
**Key words:** sludge processing, activated sludge, dewaterability, microwave irradiation

### 1. Введение

В процессе биологической очистки возникает значительное количество осадков сточных вод, которые необходимо хранить, перерабатывать и/или утилизировать различными способами. Одним из видов обработки является их аэробная стабилизация, после которой целесообразно отправлять осадок на иловые площадки для хранения и более полной переработки (Яковлев, Воронов, 2006). Важным параметром осадка, подаваемого на иловую площадку, является его способность отдавать влагу.

Влага в структуре осадка может удерживаться с помощью различных форм связи воды с твёрдыми частицами, наиболее полная классификация которых предложена академиком П.А. Ребиндером. Основываясь на данной классификации, академик С.В. Яковлев полагает, что влага в структуре осадка может находиться:

- в свободной форме (можно практически полностью удалить с помощью механических методов и естественной сушки);
- физико-механической связи (удаление в аппаратах, принцип действия которых основан на перепаде давления и/или нагревании);
- химической связи (удаляется в основном посредством сжигания) (Яковлев и др., 1975).

Вследствие того что для удаления связанной воды необходимо применение специальных устройств, одним из распространённых способов уменьшения влажности осадка сточных вод может являться его кондиционирование перед перекачиванием на иловые площадки. Перспективным методом кондиционирования является тепловая обработка, т.е. нагревание осадка до температуры 150-200 °С и последующая выдержка в течение 0,5-2 часов. В результате такой обработки происходит резкое изменение структуры осадка, а именно денатурация, распад и растворение органических веществ, в основном белков, что положительно влияет на водоотдачу и его обезвреживание. Основными недостатками данного метода являются наличие реактора, сложное конструктивное оформление процесса, большие энергетические затраты, высокая концентрация органических загрязнений в фильтрате (Яковлев, Воронов, 2006).

Эффективным способом улучшения теплового кондиционирования осадка может стать применение на практике электромагнитных полей, а точнее, энергии сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения, включающего дециметровый, сантиметровый и миллиметровый диапазоны радиоволн.

Возможность использования СВЧ-волн в области водоотведения ранее рассматривалась несколькими исследователями. Так, в Волгоградском техническом университете О.О. Ахмедова, С.Ф. Степанов, А.Г. Сошинов исследовали проблему повышения эффективности локальных очистных сооружений сточных вод за счёт применения комбинированных электрофизических методов воздействия (Ахмедова и др., 2009). В зарубежной литературе воздействию СВЧ-волн на осадок сточных вод уделено значительно больше внимания. Группа китайских учёных (Qi Yang, Xiaoli Jing, Xin Fend, Hengyi Lei и др.) изучала вопрос обезвоживаемости активного ила после СВЧ-обработки (Qi Yang et al., 2011). Австралийский (Bo Jin) и шведский (Paul Lant) учёные подробно рассмотрели вопросы изменения физических и химических свойств активного ила, а также проанализировали изменение его фракционного состава после СВЧ-воздействия (Yu Qiang et al., 2010); польская исследовательница (Ewa Wojciechowska)

изучала вопросы возможности применения микроволновой энергии для кондиционирования различных смесей осадка и активного ила муниципальных сточных вод (Wojciechowska, 2005).

В отечественной и зарубежной литературе не встречается анализ результатов исследований по влиянию СВЧ-обработки на осадки сточных вод пищевой промышленности. Данная проблема изучалась в лаборатории кафедры экологии и защиты окружающей среды МГТУ; был проведён ряд экспериментов с осадками сточных вод комбината хлебопродуктов и птицефабрики.

## 2. Результаты исследования и их обсуждение

При проведении эксперимента ставились задачи по установлению оптимального температурного режима обработки исследуемого объекта и зависимости изменения его физических свойств через степень обезвоживаемости активного ила, его осаждаемости и уплотнения. Объектами исследования являлись осадки сточных вод вторичных отстойников очистных сооружений птицефабрики и комбината хлебопродуктов, которые подвергались СВЧ-воздействию мощностью 850 Вт. Обработанная проба (600 мл избыточного активного ила) охлаждалась до комнатной температуры, и в сравнении с необработанным осадком проводились серии экспериментов, в ходе которых контролировались следующие параметры: температура; время капиллярного всасывания; объём фильтрата, полученный в течение четырёх минут фильтрования; осаждаемость; иловый индекс; доза ила.

В связи с необходимостью решения проблемы утилизации надильной жидкости при эксплуатации очистных сооружений в ходе исследований контролировались её химические показатели по стандартным методикам, были определены значения БПК<sub>5</sub> и ХПК до и после обработки осадков СВЧ-волнами (Болотина и др., 1977).

Как и следовало ожидать, динамика изменения температуры нагрева избыточного активного ила очистных сооружений комбината хлебопродуктов (АИ ХЗ), птицефабрики (АИ ПФ) и дистиллированной воды в течение определённого промежутка времени одинакова при одних и тех же параметрах обработки СВЧ-волнами: чем дольше обработка, тем выше температура (рис. 1). Нагрев проводился в течение шести минут, т.к. при дальнейшем увеличении времени СВЧ-обработки активный ил может закипеть, что, скорее всего, негативно скажется на реализации возможной технологической схемы обработки осадков сточных вод. Поскольку в активном иле отсутствуют термофильные организмы, белки которых обладают свойством термостабильности, для дальнейших исследований было принято время обработки, равное четырём минутам, при мощности 850 Вт.

Следует отметить, что достигнутые числовые значения температуры при выбранном режиме обработки активного ила и дистиллированной воды существенно различаются: исследуемых объектов – 64 и 66; воды – 74 °С (рис. 2). Несмотря на то что большую часть веществ, входящих в состав АИ, можно рассматривать как множество дипольных молекул (диполь – совокупность равных по величине и противоположных по знаку электрических зарядов  $q^-$  и  $q^+$ , расположенных на определённом расстоянии друг от друга), количество их в дистиллированной воде больше. Этим можно объяснить разницу в полученных значениях температуры, т.к. механизм СВЧ-нагрева основан на воздействии электромагнитного поля на дипольные молекулы (диполи выстраиваются вдоль силовых линий); при изменении направления этого поля диполи переворачиваются. Частота воздействующих волн равна 2 450 МГц, следовательно, за период (1 с) диполи могут перевернуться 4 900 млн раз. Эти колебания становятся причиной возникновения внутреннего трения, в результате чего выделяется тепло – объект воздействия разогревается (Козлова, 2012).

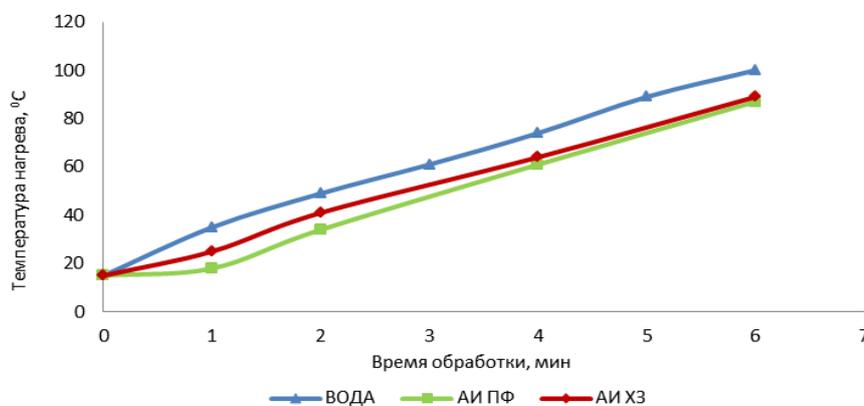


Рис. 1. Зависимость температуры избыточного активного ила от времени СВЧ-обработки

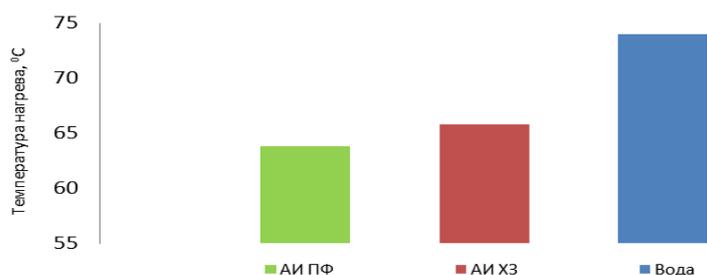


Рис. 2. Температура нагрева объектов в течение четырёх минут СВЧ-обработки

Определение фильтрационных способностей активного ила осуществлялось с помощью теста на капиллярное всасывание (CST) и измерения объёма воды, вышедшей за четыре минуты из 100 мл активного ила через фильтр "белая лента" на воронке Бюхнера, установленной на колбе Бюнзена.

Активный ил, в отличие от других осадков биологической очистки сточных вод, при уплотнении меняет свои свойства. Данное явление связано с его высокой структурообразующей способностью, что в свою очередь ведёт к иммобилизации свободной воды, т.е. часть свободной воды переходит в коллоидно-связанное состояние (Яковлев, Воронов, 2006).

В активном иле содержится белок (Николаенко и др., 2006), при нагревании которого происходит денатурация и деструкция. Изменение структуры белка может привести к изменению процентного соотношения связанной и свободной воды в активном иле, о чём косвенно может свидетельствовать изменение времени капиллярного всасывания воды из осадка сточных вод (Yu Qiang et al., 2010). Кроме того, при СВЧ-обработке значительно увеличивается способность активного ила к осаждению и уплотнению за счёт деструкции клеток и высвобождения внеклеточных и внутриклеточных полимерных веществ в жидкую фазу (Yu Qiang et al., 2010), а значит, меняется его структура, что ведёт к увеличению времени капиллярного всасывания.

Результаты исследования зависимости времени капиллярного всасывания избыточного активного ила очистных сооружений от времени обработки СВЧ-волнами представлены на рис. 3. При обработке в течение одной и двух минут активного ила комбината хлебопродуктов (25 и 41 °C соответственно) наблюдается незначительное снижение времени капиллярного всасывания (белки ещё сохраняют свою структуру), при достижении температуры 64 °C влагоудерживающие свойства осадка меняются, что обуславливается денатурацией белков, разрывом клеточных мембран и увеличением (на макроуровне) способности активного ила к осаждению и уплотнению. Избыточный активный ил очистных сооружений птицефабрики также после первой минуты обработки в СВЧ-поле несущественно теряет способность удерживать воду, а затем восстанавливает и увеличивает её.

Несколько иные результаты даёт изучение фильтрования на воронке Бюхнера, в ходе которого измерялся объём отфильтрованной воды за четыре минуты. С увеличением времени обработки СВЧ-волнами активного ила очистных сооружений комбината хлебопродуктов происходит значительное ухудшение его способности отдавать воду на фильтре, а количество фильтрата, полученного из ила птицефабрики, минимально при такой обработке в течение двух минут и численно в два раза меньше, чем в необработанном осадке (рис. 4).

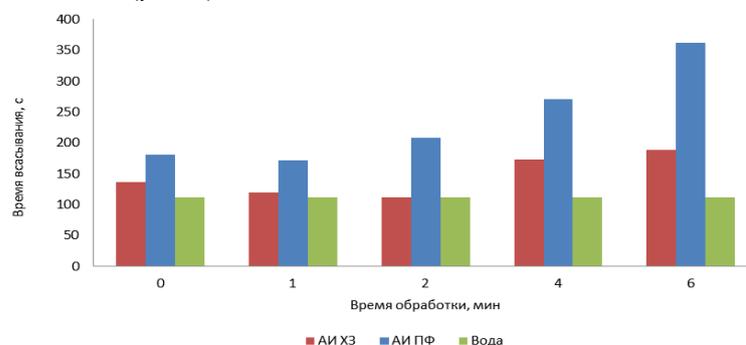


Рис. 3. Зависимость времени капиллярного всасывания влаги из активного ила от времени СВЧ-обработки

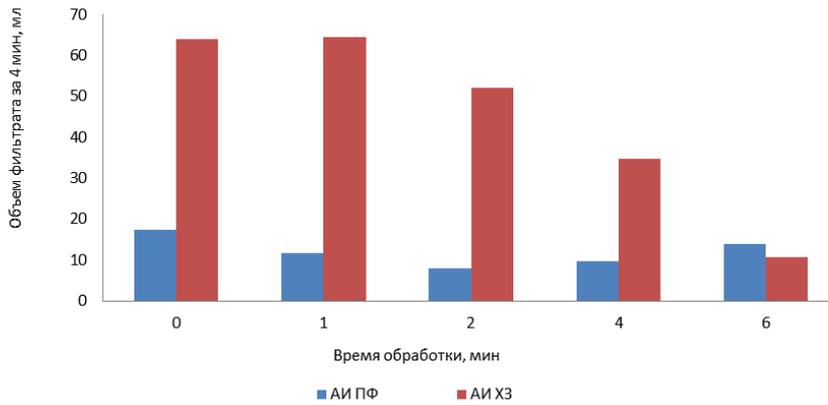


Рис. 4. Зависимость количества фильтрата, полученного из активного ила за четыре минуты, от времени обработки СВЧ-волнами

Сравнительный анализ данных, представленных на рис. 3 и 4, позволяет судить о неоднозначном протекании процессов водоотдачи осадков сточных вод, т.к. их проявление в процессах капиллярного смачивания и фильтрования различается, что, очевидно, обусловливается начальным состоянием исследуемых объектов и глубиной структурных изменений, происходящих в хлопках активного ила и белковых соединениях. О различиях в начальном состоянии активных илов косвенно свидетельствует температура систем после четырёх минут СВЧ-обработки (рис. 2). Кроме того, глубина структурных изменений является функцией от начального состояния системы. Так, если в исходном состоянии все белки имеют нативную конформацию, то увеличение температуры, скорее всего, приведёт к их денатурации, если же в исходном состоянии преобладает первичная структура, то существенных структурных изменений ожидать не приходится. Начальное состояние активного ила определяется прежде всего условиями эксплуатации очистных сооружений сточных вод.

Время капиллярного всасывания указывает на ту часть влаги осадка, которая под действием незначительного гидростатического давления способна перемещаться по капиллярам фильтра, а количество получаемого фильтрата лишь косвенно характеризует влагоудерживающую способность осадка, т.к. в данном процессе существенную роль играют сжимаемость образующегося на фильтре осадка и свойства самой фильтровальной перегородки.

Осаждаемость, уплотнение, хлопьеобразование и водоотдающие свойства активного ила тесно связаны между собой и являются важными параметрами при контроле и оценке процессов биологической очистки сточных вод, обработки и утилизации их осадков (Жмур, 2003). Разделение твёрдых частиц активного ила и надильной жидкости, т.е. осаждение и уплотнение в лабораторных условиях можно описать с помощью кривых Кинша (рис. 5-7).

Основная идея гипотезы Кинши заключается в том, что скорость оседания конкретной частицы зависит лишь от локальной концентрации этих частиц.

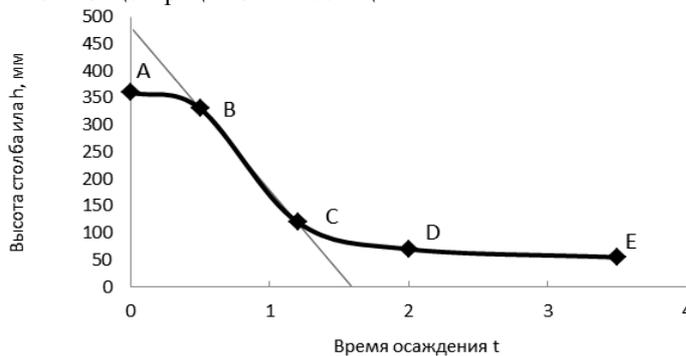


Рис. 5. Кривая Кинша (Технический справочник..., 2007)

Наиболее ответственная часть осаждения сфокусированных осадков сточных вод описывается участками BC и CD. Наклонный прямолинейный участок BC соответствует постоянной скорости оседания, которая зависит от исходной концентрации взвешенных веществ и параметров флокуляции суспензии. При увеличении исходной концентрации скорость оседания падает. Криволинейный участок CD отвечает постепенному снижению скорости оседания слоя осадка.

В результате СВЧ-обработки происходит резкое увеличение способности активного ила очистных сооружений комбината хлебопродуктов и птицефабрики осаждаться, что уменьшает время, необходимое для разделения надильной жидкости и твердой фазы (рис. 6-7).

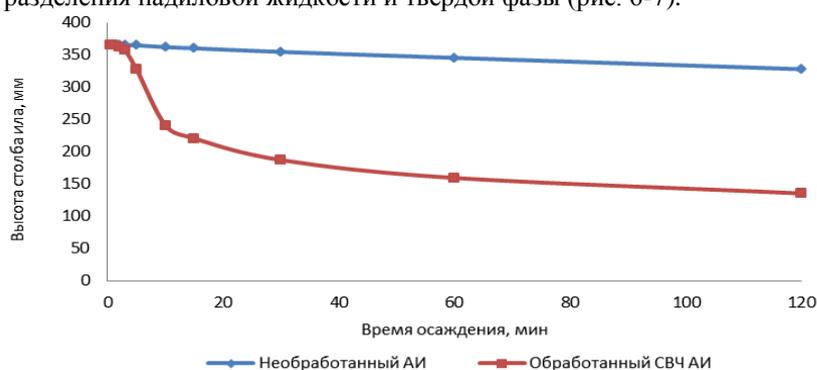


Рис. 6. Кривые осадения активного ила ПФ до и после обработки СВЧ-волнами

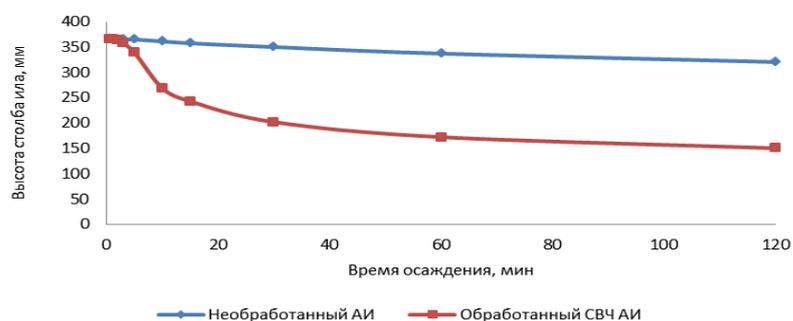


Рис. 7. Кривые осадения активного ила ХЗ до и после обработки СВЧ-волнами

Данное изменение свойств осадения и уплотнения можно объяснить изменением структуры хлопка активного ила. Под воздействием температуры и СВЧ-полей происходят его качественные и количественные изменения. Структурные изменения, описанные выше, приводят к "дроблению" хлопков активного ила; при стеснённом осадении часть их агрегирует друг с другом, образуя крупные конгломераты; скорость осадения увеличивается, но некоторые хлопки не участвуют в этом процессе и остаются во взвешенном состоянии, о чём свидетельствует увеличение мутности надильной жидкости.

Исследователи *Bo Jin* и *Qi Yang* считают, что при СВЧ-обработке происходит увеличение выделения внеклеточного полимерного вещества (EPS) в жидкость осадков, а также увеличивается концентрация белков и полисахаридов. По их мнению, EPS являются одним из механизмов образования хлопков активного ила, что может объяснить увеличение скорости раздела фаз, осадения и уплотнения активного ила после СВЧ-обработки (*Yu Qiang et al.*, 2010).

Изменение структуры хлопка может быть связано с денатурацией белка, который присутствует в составе активного ила. О денатурации органической части свидетельствует изменение концентрации БПК<sub>5</sub> и ХПК до и после обработки. Так, БПК<sub>5</sub> надильной жидкости активного ила комбината хлебопродуктов и птицефабрики увеличился на 170 и 150 % соответственно, а ХПК – на 430 и 210 % соответственно. Подобное процентное увеличение концентраций выявила и группа исследователей из *Institute of Water Environment and Ecological Restoration (Qi Yang et al.*, 2011).

Качественное изменение структуры хлопка подтверждается разницей в показателе "доза ила", который характеризует концентрацию взвешенных веществ активного ила до и после обработки (рис. 8).

Концентрация взвешенных веществ после обработки СВЧ-волнами уменьшается в обоих объектах исследования, т.е. количество частиц, оставшихся на фильтре "белая лента", сокращается при фильтровании одного и того же объёма жидкости.

По данным *С.В. Яковлева*, концентрация взвешенных веществ после термического кондиционирования в реакторе составляет 2-6 г/л (*Яковлев, Воронов, 2006*), что полностью совпадает с полученными нами результатами. Недостатком воздействия СВЧ-обработки является увеличение мутности надильной жидкости, для устранения которого может потребоваться установление дополнительной ступени очистки в технологическом процессе, т.к. вода с высокими показателями мутности при отправлении на начальную стадию технологической схемы может оказывать

дополнительную нагрузку на всю систему очистных сооружений. Способы выявления степени увеличения мутности надильной жидкости, а также процессы изменения структуры хлопка в процессе обработки требуют более детального изучения.

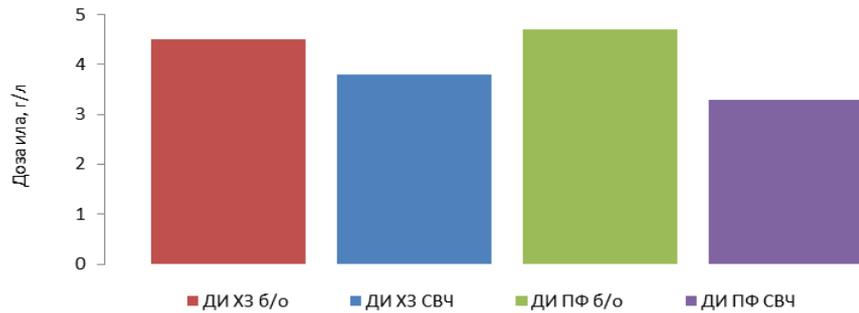


Рис. 8. Изменение дозы ила ПФ и ХЗ до и после обработки СВЧ-волнами

### 3. Заключение

Тепловая обработка является одним из перспективных методов кондиционирования осадка сточных вод. Но следует отметить, что конструкторско-проектная, эксплуатационная реализация данного метода не в полной мере проработана и имеет значительные недостатки.

Проанализировав результаты исследования воздействия СВЧ-волн на некоторые физические и химические свойства активного ила очистных сооружений двух предприятий пищевой промышленности, можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее заметное изменение свойств активного ила (600 мл), подвергнувшегося СВЧ-воздействию мощностью 850 Вт, наблюдается в течение трёх минут, но при достижении пяти минут активный ил может закипеть, что создаёт существенные трудности при внедрении данного способа в технологические схемы очистки сточных вод.

2. СВЧ-обработка активного ила очистных сооружений комбината хлебопродуктов и птицефабрики приводит к существенному увеличению скорости его осаждения и степени уплотнения.

3. Сверхвысокочастотная обработка по-разному воздействует на объекты исследования: одни контролируемые параметры в большей степени изменяются у активного ила очистных сооружений комбината хлебопродуктов (температура нагрева, объём фильтрата за определённое время), другие – у активного ила птицефабрики (время капиллярного всасывания).

### Литература

- Qi Yang, Khagendra B. Thapal, Andrew F.A. Hoadley.** Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties. *Chemical Engineering Journal*, № 171, p. 373-384, 2011.
- Wojciechowska E.** Application of microwaves for sewage sludge conditioning. *Water research*, № 39, p. 4749-4754, 2005.
- Yu Qiang, Hengyi Lei, Zhong Li et al.** Physical and chemical properties of waste-activated sludge after microwave treatment. *Water research*, № 44, p. 2841-2849, 2010.
- Ахмедова О.О., Степанов С.Ф., Сошинов А.Г., Бахтиаров К.Н.** Повышение эффективности локальных очистных сооружений сточных вод за счёт применения комбинированных электрофизических методов воздействия. *Современные проблемы науки и образования*, № 5, 261 с., 2009.
- Болотина О.Т., Болховитинова М.Н., Беличенко Ю.П. и др.** Методика технологического контроля работы очистных сооружений городской канализации. *М., Стройиздат*, 299 с., 1977.
- Жмур Н.С.** Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружения с аэротенками. *М., АКВАРОС*, 506 с., 2003.
- Козлова Т.А.** Исследование влияния СВЧ-волн на качество продуктов. *Российский журнал сельскохозяйственных и социально-экономических наук*, № 3, с. 12-17, 2012.
- Николаенко Е.В., Авдин В.В., Сперанский В.С.** Проектирование очистных сооружений канализации. *Челябинск, Изд-во ЮУрГУ*, 41 с., 2006.
- Технический справочник по обработке воды. *Уполномоченный редактор компании "Дегремон" Г.Н. Герасимов. СПб., Новый журнал*, в 2 т., т. 1, 775 с., т. 2, 920 с., 2007.
- Яковлев С.В., Воронов Ю.В.** Водоотведение и очистка сточных вод. *М., АСВ*, 704 с., 2006.
- Яковлев С.В., Карелин Я.А., Жуков А.И., Колобанов С.К.** Канализация. *М., Стройиздат*, 632 с., 1975.