

см<sup>3</sup>/моль.

Таким чином, отримані залежності дозволяють в повній мірі прогнозувати механізм масообмінного процесу сорбції забрудників з стічних вод природними сорбентами..

#### Література

1. Пимнева Л.А. Исследование кинетики сорбции и механизма взаимодействия ионов меди, бария и иттрия в фазе карбоксильного катионита КБ-4Пх2 [Текст]/ Л.А. Пимнева, Е.Л. Нестерова // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 4. – С. 24 – 28.
2. Туницкий Н.Н. Методы физико-химической кинетики. [Текст]/ Туницкий Н.Н., Каминский В.А., Тимашев С.Ф. – М.: Химия, 1972. – 198 с.
3. Петрушка І.М. Внутрішньодифузійна кінетика процесу адсорбції барвників природними сорбентами [Текст] / І.М. Петрушка // Восточно-европейский журнал передовых технологий.- 2011.-№4/б (52).- С.15-17.
4. Petrus R., Wymiana masy w układzie „ciałj stale-ciecz” [Текст]/ Akselrud G., Gumnicki Y., Piantkowski W. – Rzeszow, 1998.-365р.
5. Петрусь Р. Технології очищення стоків із застосуванням природних дисперсних сорбентів [Текст]/ Мальований М., Варчол Й., Одноріг З., Петрушка І., Леськів Г // Хімічна промисловість України. – 2003. – №2 (55). – С. 20–22.
6. Дубинин М.М. Развитие представлений об объемном заполнении микропор при адсорбции газов и паров микропористыми адсорбентами [Текст] / М.М. Дубинин, В.А. Астахов // Изв. АН СССР. Сер. хим., 1971. №1. С.5-28.
7. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах [Текст] / Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачев, В.М. Барабаш - Ленинград: Химик, 1984.- 336 с.

УДК 628.312:543:34, 628.32, 628.35

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ОБЛАСТИ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Радченко Н.Л. с.н.с.

Інститут технічної теплофізики НАН України (ІТТФ), м. Київ

*В статье представлены результаты литературного обзора новейших разработок в области очистки промышленных сточных вод, а также освещена последняя разработка в этой области Института технической теплофизики НАНУ – это технология и оборудование для безреагентной нейтрализации кислых конденсатов продуктов сгорания природного газа в отопительных и промышленных котельных.*

*The article presents the results of a literature review recent developments in the treatment of industrial waste water, as well as the latest developments in the field the Institute of Engineering Thermophysics it is technology and equipment for nonchemical neutralize acidic condensates of the combustion products gas in heating and industrial boilers.*

*Ключевые слова: нейтрализация, окислительные процессы, ультразвуковая очистка, фотокаталитические процессы, озонирование, электрохимические процессы, ферратная и персульфатная очистка.*

Вопросу очистки воды уделяется все большее внимание, как в Украине, так и во всем мире. В особенности остро стоит вопрос очистки сточных вод образующихся в результате работы предприятий черной металлургии, химической, целлюлозно-бумажной, машиностроения. На сегодняшний день особое внимание уделяется развитию новых направлений в очистке и нейтрализации загрязненных промышленных стоков. Это связано с тем, что применяемые в настоящее время традиционные методы очистки бытовых и промышленных сточных вод часто не удовлетворяют уровню качества обработки и не отвечают современным экологическим требованиям. Среди прогрессивных направлений необходимо выделить технологии основанные на окислительных процессах (АОР – англ. Advanced oxidation process). К ним относят ряд методов, в частности, плазменный, мокрое окисление, окисление в суперкритической воде, фотокаталитические процессы, озонирование, варианты процесса Фентона, электрохимические методы, метод обработки ферратами и персульфатами. Среди перспективных направлений также следует выделить метод магнитной очистки. Кроме перечисленных методов очистки в последнее время проводятся

активные работы с применением схем, в которых комбинируются процессы химического окисления - биodeградация. Особое внимание уделяется таким технологическим этапам очистки как предочистка и доочистка с применением новых видов коагулянтов, флокулянтов, фильтрационных и адсорбционных материалов. К примеру, использование новых окислителей и их комбинаций, в частности,  $\text{ClO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3/\text{УФ}$ -поглощение,  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$  и др. (процессы глубокого окисления). Также сюда относятся системы  $\text{O}_3$ /катализатор,  $\text{TiO}_2/\text{УФ}$ -поглощение,  $\text{O}_3/\text{УЗ}$  ( $\text{O}_3/\text{US}$  - ozone/ultrasound) и др. Остановимся более детально на наиболее новых методах и технологиях очистки стоков. Среди них особое внимание следует уделить плазменному методу, который на сегодняшний день еще малоизучен. Суть его заключается в возникновении плазменного разряда либо над поверхностью жидкой среды, при этом используется тлеющий, дуговой, барьерный разряды, либо в объеме жидкой среды – в результате распространения стримерного разряда внутри генерируемых или инжектируемых извне микропузырей кислорода, воздуха. При воздействии плазмы, образуются заряженные частицы, элементы в возбужденном состоянии, ударные волны, ультразвуковые колебания, радикалы, пероксиды, ультрафиолетовое излучение и вода в сверхкритическом состоянии (вследствие локального нагрева жидкости). При использовании воздуха или паров воды для производства плазменного разряда образуется озон, а в результате его трансформации - гидроксильные радикалы. Последние также образуются при непосредственной бомбардировке электронами молекул воды [1]. Данное направление активно изучается в РФ со середины 90-х годов. В частности, известно, что научными коллективами г.Москвы, г.Казани, г.Томска, - выполнен большой объем научно-исследовательских работ, конструкторских разработок по созданию компактных плазмохимических реакторов для создания холодной плазмы в газовой-жидких средах с целью очистки различных по составу сточных вод. Примером может стать объемно-диффузионный разряд в пористом электролите, как разновидность анодного разряда. Принцип работы таких установок основан на обработке разрядом в микропористой жидкости (пористого электролита). Во время работы разряда создаются акустические и ударные волны в микропористой среде. В процессе очистки вода обрабатывается холодной плазмой электрического разряда, подвергается кавитации, насыщается кислородом до концентрации, выше равновесной при данной температуре. Органические соединения окисляются до углекислого газа и воды. Несмотря на ряд успехов плазменная обработка пока не получила широкого распространения на практике в связи со сложностью масштабирования до параметров, необходимых современному потребителю и экономической не рентабельностью. Областью применения метода в дальнейшем может стать нефтехимическая, промышленность, энергетика, транспорт и пищевая промышленности [2,3].

Не меньший интерес представляет метод мокрого окисления в основу которого, заложен принцип взаимодействия в жидкой фазе между органическими соединениями и кислородом (воздухом) при повышенных температуре (160-220 °С) и давлении (12-28 бар). Химическая реакция предполагает взаимодействие органических соединений с кислородом с образованием диоксида углерода и воды. Степень минерализации при мокром окислении достигает 75...85 %. Данный метод применяется как для обработки городских и промышленных шлам-содержащих жидких отходов, так и стоков, содержащих высокое количество органических соединений. Одним из наиболее известных владельцев этой технологии в мире является компания "ГРАНИТ" (Лозанна, Швейцария) с такими ее разработками как Thonon Unit, Orbe Unit Grenzach Unit, Monthey Unit, Brunnsbüttel Unit. Известен также метод окисления в сверхкритической воде. Применяемые в данном методе свойства воды теоретически известны уже давно, однако, лишь в 70-х годах началось их использование для практических целей и лишь в последнее время – для очистки загрязненных сточных вод. В основу метода заложен принцип особого состояния воды – четвертая фаза называемая "сверхкритическая", когда температура выше 374 °С, а давление – 221бар. В таком диапазоне вода становится ни жидкостью, и ни газом, но универсальным растворителем для газов и органических веществ – даже для тех, которые в нормальных условиях нерастворимы в воде. По переходу стока в это состояние, добавляется кислород, осуществляющий быстрое и полное окисление и превращающий все органические материалы в осадке (иле) в  $\text{CO}_2$ , азот и чистую воду. Азот может безопасно выбрасываться в атмосферу, а  $\text{CO}_2$  может быть продан для промышленного применения или производства сухого льда. Все остаточные материалы не вредны, неорганические соединения легко отделяются и очищаются на отдельном этапе для восстановления фосфора. Данный метод демонстрирует необычайно высокий коэффициент разрушения органических отходов и растворения газов до 99,99 % и превосходные характеристики безвредности для окружающей среды. Этот процесс особенно хорошо подходит для очистки сточных вод целлюлозно-бумажной и фармацевтической промышленности.

К новым направлениям можно отнести и фотокаталитический метод. Основой метода является присутствие катализаторов из полупроводниковых материалов, в которых электроны находятся в свободном и связанном состояниях. В первом состоянии электроны движутся по кристаллической решетке, образованной катионами и анионами. Во втором состоянии – основном электроны связаны с каким-либо ионом кристаллической решетки и участвуют в образовании химической связи. Перевод электрона из связанно-

го в свободное состояние связан с затратами энергии не менее 3,2 эВ, которая доставляется квантами света. При поглощении света образуются свободные электроны и вакансии (дырка), которые, перемещаясь в кристаллической решетке, частично рекомбинируют, а частично выходят на поверхность. Обладая реакционной способностью электроны и дырки взаимодействуют на поверхности частиц полупроводника с кислородом, водой, органическими веществами. В результате чего образуются гидроксильные радикалы, а также ряд высокорективных кислородсодержащих соединений, который и способен минерализовать адсорбированные органические соединения, присутствующие в виде микрозагрязнений. Основное условие протекания процесса заключается в присутствии растворенного кислорода, являющегося поглотителем электронов, препятствующим их рекомбинации. Таким образом при поглощении света в частицах полупроводника происходит ряд процессов, в частности, образование пар электрон-дырка, перемещение электронов и дырок к поверхности частицы, рекомбинация электронов и дырок в объеме частицы и на ее поверхности, взаимодействие электронов и дырок с адсорбированными молекулами (этот процесс определяет эффективность катализатора). В качестве фотокатализатора чаще всего применяются следующие полупроводниковые материалы: ZnO, Cu<sub>2</sub>O, NiO, оксиды железа, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, сульфиды металлов и др. Наиболее эффективным считается диоксид титана (TiO<sub>2</sub>) [4]. Перспективным направлением считается также применение различных композитов на его основе, в частности, с активированным углем, наноструктурированных форм TiO<sub>2</sub> (наночастицы, нанотрубки, наностержни, нановолокна и др.) [5]. Реализуется процесс фотокатализа в реакторах различной конструкции, специальных модулях. Основным преимуществом таких технологий является простота, экономичность, возможность использования солнечного света.

В последние годы все больше возрастает интерес к технологиям основанным на методе озонирования. Метод окисления озоном позволяет осуществить обеззараживание, обесцвечивание загрязненной воды, устранение привкусов, запахов. На сегодняшний день озонирование применяется как одна из ключевых стадий любой современной системы очистки воды, которая сочетается чаще всего с ультрафильтрацией либо обратным осмосом. Широкое применение озона обусловлено его особенностью к быстрому разложению в воде. В процессе обработки воды озоном происходит разложение органических веществ и обеззараживание воды, при этом, бактерии погибают в несколько тысяч раз быстрее, чем при обработке воды хлором. В сравнении с другими окислителями, к примеру, хлор, озон имеет такие преимущества как возможность получения непосредственно на очистных установках, причем сырьем может служить технический кислород либо атмосферный воздух. Разновидностью данного метода является, к примеру, озонирование в присутствии пероксида водорода (процесс "Пероксон"). Это направление активно разрабатывается и на сегодняшний день уже вышло на уровень пилотных испытаний и промышленной реализации. Еще одна разновидность это озонирование при ультрафиолетовом облучении, где деградация загрязняющих веществ происходит в результате прямого фотолиза, прямого озонирования и взаимодействия с гидроксильными радикалами. Существуют также направления озонирования в присутствии активированного угля (процесс "Карбозон") либо совместного использования озонирования и ультразвука (процесс "Сонозон"). В целом, перспективность применения озонирования, как окислительного метода обусловлена тем, что не приводит к увеличению солевого состава очищаемых сточных вод, не загрязняет воду продуктами реакции, улучшает органолептические показатели, устраняет привкусы и запахи. Однако, при всех достоинствах есть и ряд недостатков: высокая стоимость озона, малое время жизни молекул озона, необходимость применения коррозионно-стойких материалов для оборудования, взрывоопасность озона, высокая чувствительность к нарушениям технологических параметров озонирования (к скорости прокачки воды и составу загрязнений), а также недопустимость присутствия в озонируемой воде клеточной массы водорослей и микроорганизмов.

Еще один довольно перспективный способ это очистка ферратами и персульфатами. Особый интерес к этому методу обусловлен тем, что ферраты (VI) и персульфаты являются одними из наиболее мощных из известных окислителей. Продуктом разложения самих ферратов в растворе является гидроксид железа, то есть малотоксичный продукт. Кроме того, гидроксид железа выделяется в виде коллоидных агрегатов с очень развитой поверхностью, которая эффективно адсорбирует ионы тяжелых металлов, частицы суспензий и органические остатки, обеспечивая дополнительную очистку воды путем коагуляции pollutants. При таких высоких показателях качества очистки данного реагента, на сегодняшний день свойства феррата еще мало изучены, а из разновидностей используется главным образом одна соль - феррат калия. Анализ публикаций показал, что наиболее активные разработки ведутся в России, в частности, в лаборатории ядерно-химических методов кафедры радиохимии Химфака МГУ, в Омске государственным аграрным университетом. Кроме этого, известно, что группами компаний различных стран мира во главе с компанией «ФТТ» (Ferrate Treatment Technologies) разработан и запатентован новый реагент – "Феррат". Также известна новая технология получения окислителя на основе феррата натрия (Na<sub>4</sub> FeO<sub>5</sub>) – ФЕРНЕЛ™, который позиционируется как экологически безопасный и эффективный реа-

гент для очистки сточных и питьевых вод. Среди перечисленных преимуществ есть и некоторые недостатки метода, которые заключаются в сложности дозирования феррата, так как он находится в промежуточном состоянии между жидким и твердым веществом. Это связано с тем, что феррат натрия является сильнейшим окислителем, коагулянтом и дозировать его нужно в минимальном количестве. Кроме этого, необходимо и соответствующее оборудование, трубопроводы, которые будут устойчивы к нему как к мощному окислителю. Аналогичными сильными свойствами владеют персульфаты ( $S_2O_8^{2-}$ ), характеризующиеся также и стабильностью при хранении. В результате активации персульфатов могут быть получены сульфатные радикалы с еще более высоким значением окислительного потенциала. Для активации персульфатов используются ионы железа, активированный уголь, а также применяется фотолит и микроволновая обработка. [6].

Значительный интерес в последние годы вызывает метод основанный на процессе Фентона, который лишь в последнее время стал активно использоваться в области очистки стоков, хотя и был открыт еще в 1884 году. Метод основан на применении во время очистки от загрязнений реагента Фентона, представляющего собой смесь перекиси водорода с солями железа(II) (обычно сульфатом). В ходе очистки ионы железа(II) окисляются пероксидом водорода до ионов железа(III), а затем снова под действием пероксида превращаются в железо(II). Метод используется для разрушения многих видов органических веществ. На практике данный процесс интенсифицируется несколькими путями: действием ультрафиолетового облучения и использованием дополнительных химреагентов. В последнее время все чаще можно встретить работы посвященные исследованию процесса электро-Фентон, а также фото-электро-Фентон, в котором процесс электро-Фентон совмещен с облучением ультрафиолетовым или солнечным светом и фотоэлектрокаталитический процесс Фентона, в котором используется тонкопленочный анод на основе диоксида титана, облучаемый ультрафиолетом. Основная сложность дальнейшего развития данного метода это необходимость в процессе обработки постоянной регулировки pH и расхода реагента, что существенно увеличивает эксплуатационные расходы.

Электрохимический метод рассматривался нами детально в ранних работах [6], в связи с этим, основное внимание будет направлено на новые разработки в этой области. В частности, анализ последних публикаций показал, что основное внимание направлено на поиск новых видов и форм материалов электродов, мембран, перегородок, а также на совмещение с процессами Фентона либо с ультрафиолетовым облучением. Приведем несколько последних разработок, в частности, электрод, выполненный из титана с активным платиновым покрытием или из титана с электрокаталитическим покрытием. Известны также разработки, в которых в качестве материала электрода применяется: допированный бором алмазный анод; платиновый и титановый с покрытием из оксидов олова, рутения и иридия анодов; анод - углеродсодержащий материал, а катод – из упругодеформируемой оболочки, внутренняя полость которой соединена с генератором импульсов давления либо катод выполнен из стеклоуглерода или углеграфитовой ткани; в качестве электродов применяется засыпная гальваническая пара, образованная алюминиевым анодом и графитовым катодом, замкнутая между собой внешней электрической цепью; электроды выполнены в виде металлической сетки и/или углеродной ткани. Дополнительно могут применяться различные диафрагмы, перегородки, мембраны и сорбенты. Еще одно направление на котором следует остановиться это магнитная очистка. Метод применяется чаще всего только как дополнение к традиционным схемам очистки сточных вод. В частности, для ускорения процессов растворения солей, коагуляции и осаждения взвесей, кристаллизации в пересыщенных растворах, увеличения прочности слипания твердых частиц в осадках. Значительные успехи в данном направлении были достигнуты японскими учеными, которые разработали сверхпроводящий магнитный сепаратор периодического действия по очистке сточных вод для целлюлозно-бумажных предприятий (компания MS-Engineering). Известны также разработки Шанхайской компании тяжелого оборудования “Мингун”, в арсенале новейших разработок которой представлен высокоградиентный магнитный сепаратор, который может применяться на металлургических заводах и электростанциях. Основным преимуществом установок данного типа является экономичность, экологическая безопасность и отсутствие вредных свойств.

В последние годы особый интерес у ученых вызывает явление кавитации и применение ее в области очистки воды поскольку многими учеными ранее доказано, что кавитационные эффекты влияют на микроорганизмы находящиеся в воде. Последние исследования показали также, что кавитационные эффекты влияют на свойства и структуру воды, однако, механизм их влияния как и степень еще мало изучены. Суть заключается в том, что под воздействием кавитации происходит образование в капельной жидкости полостей, заполненных газом, паром или их смесью (так называемых кавитационных пузырьков, или каверн). Кавитационные пузырьки образуются в тех местах, где давление в жидкости становится ниже некоторого критического значения  $P_{кр}$ , которое приблизительно равно давлению насыщенного пара этой жидкости при данной температуре. Кавитация происходит при понижении давления вследствие возникновения больших местных скоростей в потоке движущейся капельной жидкости. Образующиеся в потоке



жидкости пузырьки газа или пара, попадая с потоком в область давления меньше критического, начинают расти, а в зоне пониженного давления - начинают уменьшаться. Чем меньше газа в пузырьке, тем быстрее происходит его сокращение и тем сильнее сопровождающий его звуковой импульс. Интенсивные колебания газонаполненных пузырьков, как в свободной жидкости, так и вблизи поверхности твердых тел создают микропотоки жидкости, ускоряющие массообменные процессы. Процесс кавитации также сопровождается ионизацией газа в пузырьках и образованием  $H_2O_2$ , что приводит к иницированию и ускорению ряда химических реакций, которые зачастую невозможны в обычных условиях, в частности, окисление. В этом направлении проводятся активные работы российскими учеными. Среди них известны работы Российской компании ЗАО «АКВАМЕТОСИНТЕЗ», разработавшей технологию, включающую стадийную очистку кавитационным способом и аэрацией. Технология позволяет окислять двухвалентное железо, осуществлять деструкцию сложных органических молекул нефтепродуктов, очистку и опреснение морской воды с получением воды питьевого назначения, а также ее обеззараживание. Известно также, что проводятся работы в области очистки кислых и щелочных шахтных вод. По результатам работ предложено устройство представляющее собой прямоточный гидродинамический излучатель, который состоит из возбуждителя колебаний и колеблющейся системы, создающей кавитацию. Кавитационная область образуется внутри потока жидкости и не соприкасается с ограничивающими его поверхностями, что исключает их износ. В качестве излучателя применена упругая пластина, на которую воздействует поток жидкости, вызывая в ней изгибающие колебания и, соответственно, кавитацию. Также известны разработки, в которых кавитационная установка включает комплексное использование высокодиспергированного озона, кавитации, безреагентного коагулирования и фильтрацию. Фирма "ИНТРЭК" совместно с ОАО "Мосэнерго" разработали параметрический ряд гидродинамических кавитационных аппаратов (ГКА) проточного типа с кавитирующими телами по оси цилиндрической проточной камеры. Данные аппараты можно использовать в качестве высокоскоростных химических реакторов и насыщать в них поток воды полидисперсным ансамблем пузырьков воздуха. Широкую известность в РФ также приобрела разработка Научно-производственного центра «ТЕРОС-МИФИ» (г. Москва). Центром была создана новая технология очистки и обессоливания воды, основанная на применении гидроволнового метода, ранее не использовавшегося в этом направлении. Технология предполагает воздействие механических колебаний в сочетании с воздействием электромагнитных полей, которые создают в очищаемом растворе условия, способствующие испарению воды во много раз больше, чем в других известных случаях. Данная технология на сегодняшний день является наиболее лоббируемой среди всех перечисленных разработок, поскольку предполагает дальнейшее внедрение не только в пределах РФ, но и в странах, где водный ресурс ограничен и остро стоит проблема обеспечения питьевой водой населения.

В Институте технической теплофизики НАН Украины в рамках научного направления ДИВЭ проводятся работы по исследованию свойств воды и сложных водных систем в условиях обработки высокочастотными гидродинамическими колебаниями, сопровождающимися высокими окружными скоростями и высокими сдвиговыми напряжениями, а также быстропротекающими фазовыми переходами. При определенных условиях вода изменяет свойства, в частности водородный показатель (pH). Проведенные эксперименты на модельных жидкостях и с промышленными стоками показали эффективность использования этого метода для нейтрализации конденсатов. Для реализации метода разработана технология и оборудование, предназначенные для работы в схеме котлоагрегата в сочетании утилизатором-конденсатром. Основными преимуществами этой технологии является исключение необходимости применения химических реагентов, малая энергоемкость, компактность и удобство в эксплуатации. Внедрение такой технологии только в коммунальных котельных позволит повысить КПД котлов на 5-6 % и экономить до 500млн.м<sup>3</sup> природного газа в год. Кроме того, нейтрализация конденсата даст возможность дополнительно получить до 7,8млн. м<sup>3</sup> воды для подпитки тепловых сетей. Будет также решаться экологическая проблема сбросов кислых вод в окружающую среду.

#### **Выводы**

В статье приведены результаты проведенного литературного обзора новейших методов и оборудования для очистки промышленных сточных вод, а также освещена новая разработка в этой области Института технической теплофизики - это технология для безреагентной нейтрализации кислых конденсатов предназначенная для работы в схеме котлоагрегата в сочетании утилизатором-конденсатром. Основными преимуществами разработки является возможность повышения КПД котлов на 5-6 %, экономии до 500 млн.м<sup>3</sup> природного газа в год, а также дополнительное получение до 7,8млн. м<sup>3</sup> воды для подпитки тепловых сетей за счет возврата нейтрализованного конденсата в систему работы котлов.

#### **Литература**

1. Ю.Ф. Эль Концептуальные изменения в технологиях очистки сточных вод / Ю. Ф. Эль, Ю.И. Решетилев // Водоснабжение и санитарная техника. - 2009. - №5. - С.57-63.

2. Соловей В. В. Плазмохимическая технология утилизации углеводородосодержащих отходов/Соловей В. В., Лисьев В. Н., Воловина Т.В., Кухарская А.В. //Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2006. – Т.9, №2. – 34-35с.
3. [http://newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=1836](http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=1836)
4. Е. Н. Савинов Фотокаталитические методы очистки воды и воздуха/ Е. Н. Савинов// Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6, №11. – 52 – 56с.
5. В.Я. Кофман Новые окислительные технологии очистки воды и сточных вод/ В.Я. Кофман//Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. - №10. – 32-38с.
6. Долінський А.А. Современные методы очистки и нейтрализации промышленных стоков/ Долінський А.А., Шурчкова Ю.О., Радченко Н.Л.// Промышленная теплотехника . – 2014. – Т. 36, №6. – 89-106с

УДК [664.723.011:633.11]:631.365

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПШЕНИЦЫ В СУШИЛКЕ НА БАЗЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТЕРМОСИФОНА

Безбах И.В., канд. техн. наук, доц., Воскресенская Е.В., инженер каф. ПАиЭМ  
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина

*Исследовательский интерес статьи посвящен моделированию процесса сушки пшеницы в сушилке на основе вращающегося термосифона. Актуальность вопроса продиктована необходимостью снижения энергозатрат на процесс сушки пшеницы в аграрных масштабах. В связи с этим, разрабатываются и исследуются новые энергоэффективные конструкции сушильных аппаратов.*

*The research interest of current paper is devoted to the modeling of drying process of wheat in drier with rotating thermosyphon. The actuality of problem is dictated by the necessity of wheat drying power inputs decrease in agricultural scales. In view of this new energy efficient constructions of drying apparatuses are being elaborated and researched.*

Ключевые слова: сушка пшеницы, вращающийся термосифон

Анализ состояния зерносушильной техники на пищевых предприятиях Украины показывает, что в 48% случаев эксплуатируются шахтные агрегаты отечественного производства, энергозатраты которых составляют 5 МДж/кг и выше. При модернизации предприятий многие аграрии собираются уделить внимание участкам сушки (до 15 %) как одним из наиболее затратных в составе зернохранилищ [1]. Недостатки шахтных конвективных зерносушилок: невысокий КПД использования объема сушильного аппарата; малый удельный съем влаги; неравномерность сушки; высокие энергозатраты.

Гораздо реже (5 %) для сушки зерновых применяют сушилки с использованием водяного пара в качестве тепло- влагоносителя [1]. Такие сушилки обеспечивают высокие коэффициенты теплопередачи 30-90 Вт/м<sup>2</sup> К. Недостатки конструкций: сложная аппаратурно-техническая реализация, необходимы дополнительные устройства для подачи пара, отвода конденсата, образование водяных пробок в трубках, низкая степень перемешивания зернового потока.

В связи с этим вопрос разработки новых видов зерносушильной техники актуален. Решение проблемы – использование термосифонов (ТС), вращающихся термосифонов (ВТС), тепловых труб в технологиях сушки, утилизации теплоты уходящих газов зерносушильных установок. Использование схем на базе ВТС даст возможность экономии до 30 % энергии.

Сушилка с вращающимся термосифоном (рис. 1) состоит из корпуса 1, конденсатора 2, испарителя 3, привода 4. ВТС представляют собой герметично закрытую полость, частично заполненную теплоносителем.

При подводе теплоты к испарителю теплоноситель начинает кипеть, образующийся пар направляется в конденсатор, где конденсируется на стенках, отдавая теплоту фазового перехода охлаждающей среде. Пар перемещается за счет разности давления в испарителе и конденсаторе в результате уменьшения объема при конденсации пара. Конденсат под действием гравитационных сил движется в испаритель. Таким образом, в ВТС реализуется замкнутый испарительно-конденсационный цикл.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из парогенератора 1; конденсатора 2; корпуса 3; привода 4; манометра 5; измерительного комплекса К-50; аналого-цифрового преобразователя 7; термодатчиков 8; компьютера 9; частотного преобразователя 10.

Медь - константановые термодатчики, отградуированные в диапазоне температур 0÷100 °С, размещены