

Технические характеристики МВ сушильной установки ОНАПТ:

Потребляемая электрическая мощность:	2,5 кВт
Выходная мощность микроволновых излучателей:	1,5 кВт
Рабочая частота излучателей:	2450 МГц
Расчетная производительность по зерну пшеницы:	~40 кг./ч
Размеры установки (ДхВхШ):	3000х1000х400 мм
Высота входного окна:	20 мм
Ширина конвейерной ленты:	200 мм
Питание:	220В, 50 Гц

Задачи текущего этапа исследований проводимых на установке заключаются в отработке алгоритмов управления сушильными камерами и определении критериев оптимальной работы установки в целом. По мере наработки экспериментальных данных и по окончании доводки режимов работы установки, в планах кафедры создание предпроектного образца многоцелевой установки для микроволновой обработки растительного сырья.

### Литература

1. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008.
2. Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973.-528с
3. Явчуновский В.Я. Микроволновая и комбинированная сушка: физические основы, технологии и оборудование. -Саратов: Изд-во Саратов.Ун-та, 1999.
4. Микроволновые печи и безопасность их эксплуатации. Иваненко В.П., Мусаев А.Ф., Кузьмин В.В., Добряков А.Б., Азаев Р.А., Зуев Н.А.
5. [www.sushka.com.ua](http://www.sushka.com.ua)
6. [www.tsunghsing.com.tw](http://www.tsunghsing.com.tw)
7. [www.technopark-isc.com](http://www.technopark-isc.com)
8. [www.industrialmicrowave.ru](http://www.industrialmicrowave.ru)
9. [www.ingredient.su](http://www.ingredient.su)
10. [www.asia.ru](http://www.asia.ru)

УДК 536.24:66.012.3

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ АППАРАТА ТЕРМОВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Целью Б. Я. канд. техн. наук, Иванецкий Г. К. д-р техн. наук, ст. научн. сотр.  
Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

*Рассмотрены особенности технологии термовакуумной обработки жидкостей с использованием конденсационно-испарительной схемы регенерации тепла. На основе экспериментальных и теоретических исследований установлены оптимальные режимы работы промышленных аппаратов, используемых в данной технологии, и предложены методы повышения их энергетической эффективности.*

*The principle of operation of apparatus applied for heat-mechanical processing dairy products with using of the vaporization-condensation scheme of heat regeneration is considered. On the basis of experimental and theoretical investigation it have been found the optimum operation conditions of the commercial apparatus and proposed rational methods of improving their efficiency.*

**Ключевые слова:** дискретно-импульсное введение энергии (ДИВЭ), термовакуумная обработка (ТВО), энергетическая эффективность, капля, испарение, конденсация.

В Институте технической теплофизики НАН Украины в рамках научного направления дискретно-импульсного ввода энергии в гетерогенные среды разработан принципиально новый эффективный способ термовакуумной обработки жидкостей с целью получения конечного продукта с высокими качественными показателями. Высокая эффективность обработки гетерогенных жидкостных систем (например, молока или иных многокомпонентных жидких смесей биологического происхождения) обусловлена возможностью реализовать в объеме системы различного рода гидродинамические и термические воздействия, такие как адиабатное вскипание, кавитация, большие градиенты давлений и температур, интенсивный тепло- и массоперенос через межфазную поверхность и др. [1]. Изучение механизмов, определяю-

щих эффективность таких воздействий, возможность их целенаправленного использования в конкретных технологиях, поиск и обоснование оптимальных режимов обработки по критериям энергосбережения представляют научный и практический интерес. На основе комплексного изучения совокупности тепло-массообменных и гидродинамических процессов, обеспечивающих высокую эффективность данного способа, созданы практические технологии и оборудование, которые в настоящее время успешно используются в различных отраслях промышленности [2].

Наиболее широкое применение эти технологии нашли в молочной промышленности с целью гомогенизации цельного молока и молочных продуктов, а также для улучшения качественных показателей конечного продукта и продления его срока хранения. Касательно обработки молока и молочных продуктов – это повышение термостабильности, снижение кислотности, улучшение органолептических характеристик, подавление нежелательной микрофлоры и т.п. Все это в совокупности позволяет получать продукт высокого качества и продлить его срок хранения без добавления каких-либо консервирующих добавок.

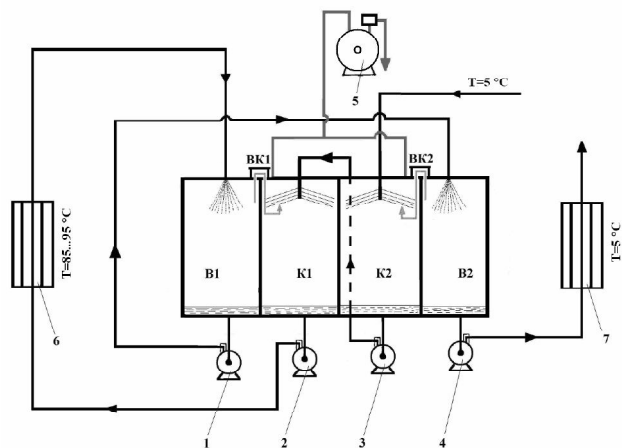
Эффективность способа официально подтверждена независимыми экспертами ведущих специализированных организаций – Институтом микробиологии им. Заболотного НАН Украины, Институтом экологии и токсикологии им. Медведя МОЗ Украины и Литовского филиала ВНИИМС.

Также обнаружено, что при обработке артезианской воды на аппарате ТВО наблюдаются эффекты повышения водородного показателя (рН), снижение общей щелочности, твердости, изменение микроструктуры сухого остатка [3, 4]. Это доказывает возможность использования механизмов ДИВЭ для влияния на кинетику протекания химических процессов.

Методы обработки, использованные в технологии ДИВЭ, основаны, в первую очередь, на направленном применении совокупности физических эффектов, которые возникают в процессе адиабатного вскипания перегретой жидкости. Кроме этого, обеспечивается чрезвычайно высокая интенсивность переноса тепла и вещества через межфазную поверхность жидкость – пар в процессах конденсации и испарения в среде перегретого пара. Это позволяет за очень короткий промежуток времени нагревать или охлаждать большое количество жидкой смеси и тем самым влиять на кинетику протекания тепло- и массообменных, химических или биологических процессов в жидкости. Объектами обработки могут быть различные жидкости, растворы, эмульсии, гетерогенные жидкие смеси и т.п. Общий принцип работы аппаратов, которые используются в технологии ТВО следующий.

Охлажденная жидкость (жидкостная смесь) через распылительную форсунку поступает в камеру, которая содержит под низким давлением перегретый пар этой жидкости. Благодаря конденсации пара на каплях холодной жидкости последняя в процессе падения в камере быстро нагревается. Далее нагретую жидкость центробежным насосом подают на вход нагревателя, где она под высоким давлением окончательно нагревается до заданной по условиям технологии высокой температуры.

С выхода теплообменника нагретая жидкость вытекает через короткую трубу в камеру, которая, как и предыдущая камера, содержит перегретый пар под низким давлением. За счет большого перепада давления вдоль трубы жидкая фаза смеси за время перетекания через трубу становится существенно перегретой и, как следствие, происходит ее интенсивное адиабатное вскипание, сопровождающееся быстрым ростом большого количества паровых пузырьков. Благодаря разрушающему гидромеханическому действию совокупности растущих пузырьков, смесь поступает в камеру низкого давления в виде полидисперсного факела мелких капель. Интенсивное испарение капель в среде перегретого пара ведет к их быстрому охлаждению. Далее жидкость с помощью центробежного насоса перекачивают в емкость, оснащенную холодильником, в которой жидкостная



1, 2, 3, 4 – центробежные насосы; 5 – вакуумный насос; 6 – нагреватель; 7 – холодильник; K1 и K2 – камеры конденсации, B1 и B2 – камеры вскипания, BK1 и BK2 – соединительные каналы, соответственно, I и II ступени.

**Рис. 1 – Принципиальная схема аппарата ТВО**

смесь охлаждается до нужной по технологии температуры.

На рис. 1 показана принципіальна схема апарату ТВО, загальний принцип роботи якої описан вище. Слід прийняти до уваги те, що апарат складається з двох секцій, тобто вищеописані процеси протікають двічі, оскільки апарат має по дві камери конденсаційного нагрівання та випаровувального охолодження.

При застосуванні методу ТВО виникають і корисно використовуються різні механізми ДИВЭ. В залежності від напрямку практичного застосування технології переважаючу роль грає той чи інший механізм в залежності від конструкції апарату та вибору оптимального режиму ведення процесу. Оптимальні умови створюються шляхом варіації значень температури та тиску в камерах, де відбуваються процеси випаровування та конденсації, температури нагрівача, ступеня диспергування рідини на вході в камери та т.д. Динамічні ефекти вибухового кипіння, а також вплив напружень зсуву розтягуючих мікропотоків міжпузьрькового простору сукупності бульбашок, які ростуть в процесі адиабатного кипіння рідини, призводять до інтенсивного дроблення дисперсних включень [5, 6]. Крім того, досить сильне гідромеханічне вплив на рідинну суміш обумовлено кавітаційними ефектами, які завжди мають місце в центробіжних насосах. По комплексному впливу на оброблювані продукти при мінімальних витратах удільної енергії технологія ТВО не має аналогів.

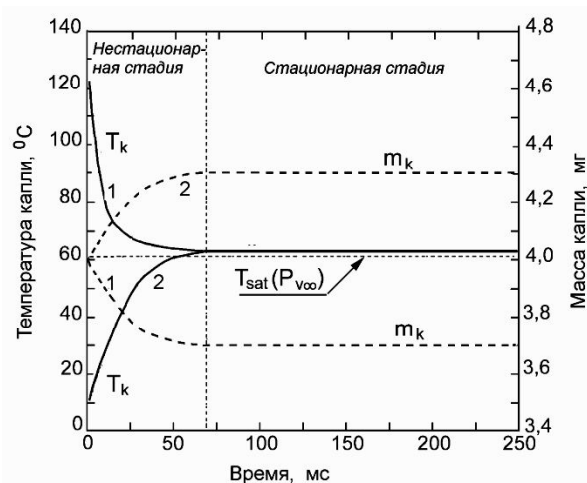
С енергетичної точки зору теплообмінні апарати, що використовуються в цій технології, можна розглядати як ефективні рекуператори, в основі роботи яких лежить випаровувально-конденсаційна схема, що забезпечує високий рівень теплопередачі між гарячим та холодним потоком рідини, підлягачої обробці. Високі значення коефіцієнта теплопередачі та незвичайно розвита поверхня теплообміну досягаються за рахунок розпилення оброблюваної рідини на вході в конденсаційні та випаровувальні камери апарату, всередині яких знаходиться перегретий пар низького тиску. При роботі апарату надлишок пари, що утворюється в випаровувальній камері при випаровуванні розпиленої нагрітої рідини, через вузький з'єднаний канал переходить в камеру конденсації, де конденсується на краплях розпиленої холодної рідини. В обох камерах стабілізується практично однакове тиску пари, яке визначається початковими значеннями температури холодної та нагрітої рідини. Осаджуюча на дно камери рідина перекачується з допомогою насоса в наступну камеру.

Апарати ТВО характеризуються порівняно невеликими удільними витратами енергії та високою надійністю в роботі. Разом з тим, аналіз роботи апаратів в умовах виробництва показав принципову можливість підвищення ефективності їх роботи та зниження невиробничих енергетичних витрат.

Основні витрати енергії при використанні даної технології пов'язані з нагріванням рідини в нагрівачі та наступним охолодженням її в холодильнику. Тому рідина на виході з конденсаційної камери перед пастеризатором повинна бути достатньо нагрітою, а на виході з камери випаровування перед холодильником – достатньо охолодженою, з тим, щоб знизити величини перепаду температур до мінімально можливих значень і тим самим зменшити невиробничі втрати енергії. Режим роботи апарату, при якому забезпечуються умови досягнення мінімальних значень перепаду температур, будемо називати ідеальним режимом.

Розрахунки показують, що при ідеальному режимі роботи двохступенчастої випаровувально-конденсаційної схеми теоретично досяжні мінімальні значення величин перепаду температури до і після нагрівача  $\Delta T_1$ , а також до і після холодильника  $\Delta T_2$  однозначно визначаються співвідношенням  $|\Delta T_1|_{\min} = |\Delta T_2|_{\min} = (T_{\text{нагр}} - T_{\text{хол}}) / 3$ . Проблема оптимізації режимів роботи промислового апарату з точки зору енергозбереження пов'язана з пошуком та усуненням причин, що перешкоджають наближенню роботи апарату до ідеального режиму.

Для обґрунтування оптимальних режимів роботи апаратів ТВО, що містять дві конденсаційні та дві випаровувальні камери, розроблена математична модель конденсаційного росту та випаровування сукупності крапель в процесі їх переміщення в середі перегретого пари [7]. Модель адекватно описує нестационарну та стационарну стадії процесу в широкому інтервалі температури та тиску пари, а також початкового розміру та початкової швидкості крапель в факелі розпилення з урахуванням визначальних фізичних факторів та без використання яких-небудь емпіричних параметрів. В моделі враховується також наявність градієнта температури в краплі в нестационарній стадії випаровування (конденсації), що дозволяє точно передбачити момент стабілізації температурного поля в краплі при переході до стационарного режиму випаровування, розрахувати температуру рівноважного випаровування крапель та значення числа Нуссельта при різних заданих режимних параметрах рідини та пари [8].



1 – испарение капли; 2 – рост капли вследствие конденсации на ней пара.

**Рис. 2** – Изменение температуры и массы капли воды, помещенной в перегретый пар

Как показывают расчеты, температура равновесного испарения капель в перегретом паре практически не зависит от температуры пара и близка к температуре кипения жидкости при давлении в паровой фазе, лишь слегка превышая это значение. Если капля на входе в камеру перегрета относительно равновесной температуры, происходит интенсивное испарение жидкости и резкое снижение ее температуры до равновесного значения (рис. 2). Далее процесс испарения протекает в монотонном стационарном режиме при постоянной температуре капли. Если на входе в камеру капля недогрета до равновесной температуры, пар интенсивно конденсируется на ее поверхности, что приводит к быстрому нагреву жидкости до равновесной температуры. Далее процесс конденсации переходит в стационарную стадию монотонного испарения при постоянной температуре. Время нестационарного испарения (или конденсации) капли ничтожно мало по сравнению со временем ее испарения в стационарном режиме.

Но именно в нестационарной стадии происходит полное охлаждение или нагрев жидкости до равновесной температуры за счет интенсивного тепло- и массообмена с перегретым паром.

Анализ результатов расчета, выполненных на основе модели, показывает, что на протяжении нестационарной стадии процесса температура в центре капли отличается от температуры поверхности и только выравнивание температуры по всему объему капли определяет завершение нестационарной стадии. Уравнения модели позволяют при заданных начальных условиях точно оценить длительность протекания нестационарной стадии.

Оптимизация работы аппарата ТВО предполагает создание условий, при которых капли распыленной жидкости, как в камерах конденсации, так и в камерах испарения, за время своего падения на дно камеры успевают достигнуть равновесной температуры. Выполнение этих условий зависит от степени диспергирования жидкости и начальной скорости капель на входе в камеры.

В результате экспериментальных исследований установлено, что основной причиной отклонения работы аппарата от идеального режима являлась недостаточная высокая степень диспергирования жидкости в камерах конденсации, что, в свою очередь, приводило к повышенным непроизводительным затратам энергии на нагревание и охлаждение жидкости. Установлено, что доля этих непроизводительных энергетических затрат могла достигать 30 % от общих затрат энергии на работу аппарата, что составляет примерно 36 кВт·ч на 1 тонну обрабатываемого продукта.

На базе модели создана аналитическая методика расчета аппарата ТВО, которая позволяет рационально выбрать распылительные устройства для ввода жидкости в камеры аппарата, рассчитать оптимальные габариты камер и парожидкостного тракта, а также осуществить выбор вакуумного и центробежных насосов.

### Выводы

Проведенные исследования позволили значительно сократить непроизводительные затраты энергии на работу аппарата, что является очень актуальным на сегодняшний день, поскольку возникшая ситуация с дефицитом и ростом цен на энергоносители заставляет принимать действия, направленные на рациональное использование энергии. Особенно актуально это для Украины, так как снижение уровня энергетической зависимости является составной частью энергетической безопасности страны.

Аналитическая методика расчета аппарата лежит в основе создания модификации аппарата ТВО более высокой производительности для потребностей предприятий молочной промышленности. Теоретический расчет степени диспергирования жидкости и рациональных габаритов и формы камер позволил снизить до минимума непродуктивные потери энергии при эксплуатации этих аппаратов.

Изготовленный опытно-промышленный образец аппарата ТВО внедрен для промышленной эксплуатации на одном из молочных предприятий Украины.

### Література

1. Долинский А. А. Теплообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии / А. А. Долинский, Г. К. Иваницкий. – К. : Наукова думка, 2008. – 381 с.
2. Шурчкова Ю.А. Адиабатное вскипание. Практическое использование / Шурчкова Ю. А. – К. : Наукова думка, 1999. – 278 с.
3. Долинский А. А. Изменение микроструктуры сухого остатка воды при различных способах её обработки / А. А. Долинский, Ю. А. Шурчкова, А. В. Сланик // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 7. – С. 86–89.
4. Шурчкова Ю. А. Исследование влияния дискретно-импульсного ввода энергии на физико-химические показатели воды / Ю. А. Шурчкова, А. В. Коник // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 3. – С. 108–112.
5. Долинский А. А. Исследование процесса эмульгирования при адиабатическом вскипании многокомпонентных систем / А. А. Долинский, Ю. А. Шурчкова, В. К. Буримский // Молочная промышленность. – 1986. – № 10. – С. 15–18.
6. Иваницкий Г. К. Разрушение капель эмульсии в адиабатно вскипающих потоках / Г. К. Иваницкий // Промышленная теплотехника – 1999. – Т. 21, № 4–5. – С. 10–15.
7. Иваницкий Г.К. Тепло- и массообмен при испарении и конденсационном росте капель в воздухе и в перегретом паре / Г. К. Иваницкий, Б. Я. Целень // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 6. – С. 56–63.
8. Иваницкий Г.К. Распределение температуры в объеме сферической капли в процессе нестационарного испарения / Г. К. Иваницкий, Б. Я. Целень // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 7. – С. 117–121.

УДК 676.026.522

## ЗАСТОСУВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ПРОЦЕСІ СУШІННЯ ПАПЕРУ

Новохат О.А., асистент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ

*В роботі приведені результати дослідження кінетики сушіння паперу із застосуванням інфрачервоного випромінювання.*

*The results of kinetics of infrared drying of paper were presented in this article.*

**Ключові слова:** Сушіння, папір, інфрачервоне випромінювання, вологовміст.

Сушіння паперового полотна є одним з найбільш енергозатратних процесів в целюлозно-паперовому виробництві. Збільшення швидкостей папероробної машини, зменшення енергетичних затрат, металоемності конструкції вимагають інтенсифікації процесу сушіння та модернізації самої сушильної частини.

Найбільш поширеним методом сушіння паперу є контактний на сушильних циліндрах в одно- чи двоярусній сушильній частині. Одними з недоліків даного типу є складність конструкції (в зв'язку з застосуванням пари як теплоносія) та велика її металоемність. Пар в якості теплоносія має обмежений теплообмінний потенціал. Збільшення останнього за рахунок збільшення його тиску після деяких значень є нецільним.

Ще одним недоліком контактної типу сушіння є несиметричність процесу. Це виражається в тому, що тепло підводиться по чергово до однієї з сторін паперового полотна, а випаровування відбувається з протилежної (рис. 1). Волога переміщується в протилежну сторону від поверхні циліндру. Коли папір зходить з сушильного циліндру, то охолоджується і волога частково конденсується. На новому циліндрі волога знову починає переміщуватись в інший бік полотна.