

УДК 536.24:66.012.3

ИВАНИЦКИЙ Г.К.,  
ЦЕЛЕНЬ Б.Я., НЕДБАЙЛО А.Е.*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ В ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПРОДУКТОВ

Розглянуто особливості технології термомеханічної обробки біологічно активних рідких продуктів з використанням конденсаційно-випарної схеми регенерації теплоти. На основі експериментальних і теоретичних досліджень встановлено оптимальні режими роботи промислових апаратів, які використовуються в даній технології, і запропоновано методи підвищення їх енергетичної ефективності.

Рассмотрены особенности технологии термомеханической обработки биологически активных жидких продуктов с использованием конденсационно-испарительной схемы регенерации теплоты. На основе экспериментальных и теоретических исследований установлены оптимальные режимы работы промышленных аппаратов, которые используются в данной технологии, и предложены методы повышения их энергетической эффективности.

We consider specific features of the technology of thermomechanical treatment of biologically active liquid products with using the vaporization-condensation scheme of heat regeneration. On the basis of experimental and theoretical investigations, we have found the optimal conditions of the operation of commercial apparatus, used in this technology, and proposed rational methods of improving their efficiency.

 $P$  – давление; $T$  – температура; $\Delta T$  – разность температур; $B$  – камера испарения; $BK$  – соединительный канал; $K$  – камера конденсации.**Индексы:**

1 – первая секция;

2 – вторая секция;

 $B1$  – камера испарения первой секции; $B2$  – камера испарения второй секции; $vx$  – вход; $вых$  – выход; $K1$  – камера конденсации первой секции; $K2$  – камера конденсации второй секции;

кип – кипение;

нагр – нагреватель;

нас – насыщение;

хол – холодильник.

В Институте технической теплофизики разработана принципиально новая технология и аппарат, которые предназначены для обработки термочувствительных биологически активных жидкостей с целью повышения качественных показателей продукта [1]. Технология разработана на базе фундаментальных исследований в рамках научного направления дискретно-импульсного ввода энергии в гетерогенные среды. Высокую эффективность обработки многокомпонентных жидкостных смесей по этой технологии достигнуто вследствие инициирования в аппарате разнообразных гидромеханических и термических эффектов, таких как взрывное вскипание, кави-

тация, десорбция, интенсивный тепло- и массообмен на границе раздела фаз и прочие при существенно низких затратах энергии.

Обработка термочувствительных биологически активных жидких продуктов по этой технологии характеризуется рядом положительных технологических показателей, а именно: повышением термостабильности продукта в процессе обработки, снижением его кислотности, улучшением органолептических характеристик вследствие глубокой дегазации и дезодорации, а также подавлением нежелательной микрофлоры, которые в конечном итоге разрешают получать продукт высокого качества и значительно увеличить

сроки его хранения без введения каких-либо реагентов. Также выявлен принципиально новый эффект — способность белков восстанавливать утраченные нативные свойства.

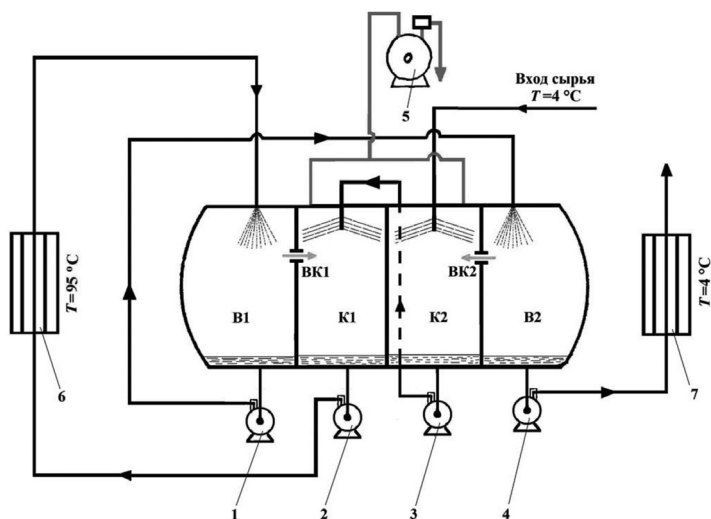
Для выполнения оптимальных условий предусмотренной в технологии регенерации теплоты применяется испарительно-конденсационная схема обработки, которая обеспечивает возможность существенного уменьшения энергетических затрат. Для повышения энергетической эффективности работы в аппарате реализуется двухступенчатая испарительно-конденсационная схема обработки.

Аппарат состоит из двух секций, каждая из которых имеет испарительную и конденсационную камеры. Испарительные камеры первой и второй секции обозначим  $V_1$  и  $V_2$ , а камеры конденсации — соответственно  $K_1$  и  $K_2$ . В верхней части каждой камеры установлен патрубок, через который диспергированная жидкость поступает в камеру. На дне каждой из камер находится отверстие, через которое жидкость, собирающаяся на дне камеры, выводится из камеры с помощью насоса. В обеих секциях испарительная и конденсационная камеры соединены между собой специальным патрубком ВК, через который пар из испарительной камеры поступает в камеру конденсации.

На рис. 1 показана принципиальная схема работы аппарата. Перед началом работы во всех камерах аппарата с помощью вакуумного насоса 5 создается вакуум, поэтому в процессе работы газовая фаза внутри камер состоит лишь из пара без присутствия воздуха. В процессе стабильной работы давление пара в камерах аппарата определяется условиями испарения горячей распыленной жидкости в камерах испарения или конденсации пара на холодных каплях распыленной жидкости в камерах конденсации. Охлажденная жидкость с температурой 4...5 °С через распылительное устройство (форсунку) подается на вход аппарата — в камеру конденсации  $K_2$ . Нужно заметить, что расход жидкости остается постоянным на протяжении всего процесса обработки. Пар, поступающий из камеры испарения  $V_2$  в камеру конденсации  $K_2$  через соединительный канал ВК<sub>2</sub>, конденсируется на холодных каплях факела, который обеспечивает повышение

температуры жидкости на выходе из камеры  $K_2$  до значения  $T_{K_2}^{вых} \approx T_{кип}(P_{K_2})$ , где  $T_{кип}(P_{K_2})$  — температура кипения жидкости при давлении в камере  $K_2$ . С помощью насоса 3 жидкость из камеры  $K_2$  через трубопровод и форсунку подается на вход камеры  $K_1$ . В этой камере пар, который поступает через соединительный канал ВК<sub>1</sub> из испарительной камеры  $V_1$ , конденсируется на каплях диспергируемой жидкости. Вследствие конденсации пара температура жидкости в камере  $K_1$  дополнительно повышается до значения  $T_{K_1}^{вых} \approx T_{кип}(P_{K_1})$ . Из камеры  $K_1$  уже подогретая жидкость насосом 2 подается в нагреватель, где нагревается до необходимой по условиям технологии температуры  $T_{нагр} = 95$  °С.

После нагревателя жидкость под давлением через цилиндрический канал поступает на вход камеры испарения  $V_1$ . Поскольку давление в этой камере намного ниже давления насыщения при температуре  $T_{нагр}$ , внутри цилиндрического канала происходит интенсивное адиабатное вскипание жидкости, тем интенсивнее, чем выше уровень перегрева  $\Delta T = T_{нагр} - T_{кип}(P_{V_1})$ . Быстрое вскипание перегретой жидкости в канале сопла оказывает содействие интенсивному росту количества паровой фазы, удалению из жидкости растворенных газов (диоксида углерода, азота, кислорода, и т.п.), а сопутствующие гидромеханические эффекты обеспечивают интенсивное диспергирование жидкости. Вследствие этого жидкость на вход камеры  $V_1$  поступает в виде факела мелкодисперсных капель. Вместе с жидкостью в камеру поступает определенное количество пара, который образуется в результате вскипания. Благодаря высокой температуре жидкости на входе в камеру ( $T_{V_1}^{вх} \approx T_{нагр} = 95$  °С) и низкому давлению пара ( $P_{V_1} \approx 0,01$  МПа), внутри камеры происходит интенсивное испарение капель в среде перегретого пара, вследствие чего в объеме камеры выделяется большое количество пара, а жидкость на выходе из камеры  $V_1$  охлаждается до температуры  $T_{V_1}^{вых} \approx T_{кип}(P_{V_1})$ . Излишек пара из камеры через соединительный канал ВК<sub>1</sub> переходит в камеру  $K_1$ , где конденсируется на более холодных каплях. Жидкость из камеры  $V_1$  насосом 1 подается на вход камеры испарения второй секции  $V_2$ . В этой камере процесс испарения осуществляется по той же самой схеме, что и в



**Рис. 1. Принципиальная схема работы аппарата:**  
 1, 2, 3, 4 – продуктовые насосы; 5 – вакуумный насос; 6 – нагреватель; 7 – холодильник;  
 $K_1, K_2$  – камеры конденсации, а  $V_1, V_2$  – камеры испарения соответственно I и II секции;  
 $BK_1, BK_2$  – соединительные патрубки между испарительной и конденсационной камерами соответственно I и II секции.

камере  $V_1$ , но при других значениях давления и температуры. Излишек пара, который образовался в этой камере, через соединительный канал  $BK_2$  попадает в камеру  $K_2$ , где, как упоминалось выше, конденсируется на каплях охлажденной жидкости. Из камеры  $V_2$  жидкость с температурой  $T_{B2}^{вых} \approx T_{кип}(P_{B2})$  насосом 4 подается в холодильник, где охлаждается до температуры  $T_{хол} = 4^\circ\text{C}$ . На этом процесс обработки жидкости в аппарате завершается. Десорбированные из жидкости нейтральные газы выводятся с обеих конденсационных камер вакуумным насосом 5.

Аппараты для реализации данной технологии обработки жидкости широко используются в молочной промышленности. Они характеризуются высокой надежностью в работе и сравнительно небольшими удельными затратами энергии. Сырье, которое поступает на обработку по технологическим требованиям должно быть нагретым до определенной высокой температуры (например, с целью его пастеризации), а потом снова охлажденным до начальной температуры. Реализованная в аппарате конденсационно-испарительная схема обработки обеспечивает оптималь-

ные условия регенерации теплоты, которые лежат в основе этой технологии и, соответственно, повышение энергетической эффективности аппарата.

Для обоснования оптимальных режимов работы аппарата и минимизации непроизводительных затрат энергии при применении данной технологии разработана и апробирована в условиях производства специальная математическая модель. Модель, которая предназначена для расчета баланса энергии в жидкостном и паровом трактах аппарата, описывает гидродинамические процессы, процессы тепломассообмена и кинетику фазовых переходов на границе диспергированная жидкость – пар в камерах конденсации и испарения. При применении модели для анализа результатов экспериментов, проведенных в производственных условиях было установлено, что существует принципиальная возможность повышения эффективности работы аппарата и снижения непроизводительных затрат энергии [2].

Анализ конденсационно-испарительной схемы позволяет определять оптимальные значения температуры жидкости на выходе из каждой камеры аппарата, а также оптимальные значения давления и температуры пара в камерах.

Если известны (заданные технологическими условиями) температуры нагревателя  $T_{нагр}$  и холодильника  $T_{хол}$ , то температура жидкости из камер аппарата определяется по следующим формулам:

$$T_{K1}^{вых} = \frac{2T_{нагр} + T_{хол}}{3}, \tag{1}$$

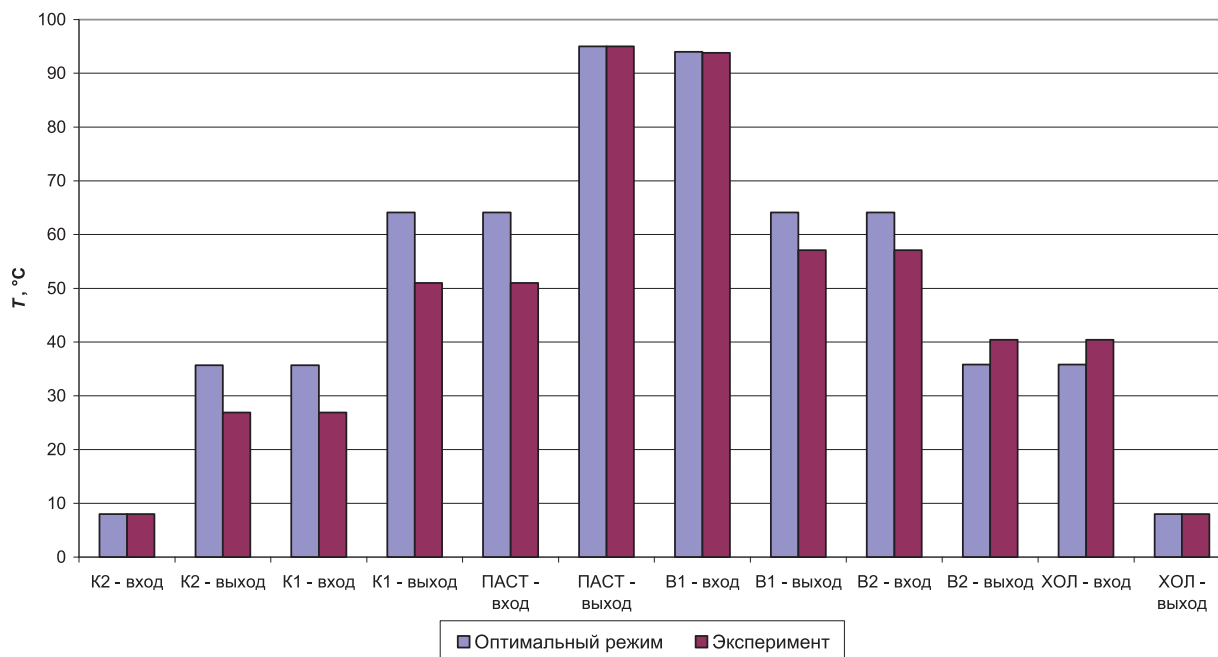
$$T_{B2}^{вых} = \frac{T_{нагр} + 2T_{хол}}{3}. \tag{2}$$

Из приведенного выше анализа работы аппарата давление в обеих камерах каждой секции аппарата определяется из следующих уравнений:

$$P_{K1} = P_{B1} = P_{нас}(T_{K1}), \tag{3}$$

$$P_{B2} = P_{K2} = P_{нас}(T_{B2}). \tag{4}$$

Очевидно, что для того, чтобы избавиться от лишних энергетических потерь, нужно, чтобы температура перед входом в нагреватель (темпе-



**Рис. 2.** Сравнение экспериментальных и расчетных значений изменения температуры жидкости на этапах переработки в аппарате.

ратура на выходе из камеры  $K_1$ ) была максимально приближена к той температуре, значение которой получено при расчете по математической модели аппарата. Такое же условие должно выполняться и для температуры перед входом в холодильник (температура на выходе из камеры  $B_2$ ).

На рис. 2 приведено сравнение экспериментальных и расчетных значений температуры жидкости на всех этапах переработки молока в аппарате. Оптимальные значения температуры отвечают условиям минимальных затрат энергии в стабильном режиме работы.

При сравнении полученных результатов видим, что жидкость перед входом в нагреватель недогрета до оптимального значения на  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а перед входом в холодильник — перегрета относительно оптимального значения на  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Проведенный предварительный анализ энергетической эффективности технологии на аппарате ВГ-5 в заводских условиях показал, что для аппарата производительностью  $5\text{ т/ч}$ , на котором проводилось исследование, только за счет повышения температуры жидкости перед нагревателем на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  экономия энергии составляет  $21\text{ МВт}\cdot\text{ч}$ .

Итак, в идеальном случае суммарная экономия энергии для аппарата производительностью

$5\text{ т/ч}$  будет составлять  $273\text{ МВт}\cdot\text{ч}$ . Энергия, которая затрачивается на нагревание жидкости в пастеризаторе после выхода из первой камеры конденсации в существующих условиях (от  $51\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ , как показано на рис. 2) составляет  $924\text{ МВт}\cdot\text{ч}$ . В результате этого затраты энергии при работе аппарата в оптимальном режиме уменьшатся на  $29,5\%$ . Для более наглядного представления того, какое количество энергии можно сэкономить, достаточно сравнить его с затратами электроэнергии на насосы, составляющими  $26\text{ кВт}\cdot\text{ч}$ .

Разработанная нами математическая модель процессов тепло- и массообмена при применении конденсационно-испарительной схемы регенерации теплоты позволяет установить причины таких больших непроизводительных затрат энергии и предложить путь оптимизации работы аппаратов этого типа.

Модель [2] дает возможность описать кинетику процессов испарения и конденсации в камерах аппарата, то есть интенсивность нагрева или охлаждения жидкости в соответствующих камерах в зависимости от степени диспергирования жидкости.

С помощью модели установлено, что, чем меньше размер капли факела диспергированной

жидкости на входе в камеры аппарата, тем больше процессы тепло- и массообмена приближены к оптимальному режиму.

Установлено, что высокая степень диспергирования (меньше 800 мкм) достигается в обеих камерах испарения, где распыление отличается вследствие взрывного вскипания существенно перегретой жидкости.

На входе в камеры конденсации жидкость диспергируется с помощью механических форсунок и средний диаметр капли превышает 2 мм. Кроме того, значительная часть жидкости стекает по стенкам в виде пленки, что дополнительно уменьшает удельную поверхность массообмена.

Применение в этих камерах более мощных распылителей, которые обеспечивают диспергирование до средних размеров капель порядка 50...100 мкм, позволит существенно повысить энергетическую эффективность аппарата.

Таким образом, предварительный анализ энергетических затрат указывает на то, что в данном аппарате экономия энергии имеет существенное значение для промышленности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ю.А. Шурчкова.* Адиабатное вскипание. Практическое использование. – К.: Наук. думка, 1999. – 228 с.
2. *Г.К. Иваницкий, Б.Я. Целень.* Взаимодействие капель распыленной жидкости с перегретым паром в процессах конденсации и испарения // XIII научная конференция стран СНГ “Дисперсные системы” Материалы конференции. – Одесса: 2008. – С.156 – 157.

*Получено 20.10.2008 г.*