

**А.А. Долинский, Ю.А. Шурчкова, Г.К. Иваницкий, Б.Я. Целень**

Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ МОЛОКА**



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

*Ключевые слова:* молоко, термовакuumная обработка, капля, испарение, конденсация, энергетическая эффективность.

В рамках научного направления дискретно-импульсного ввода энергии в гетерогенные среды нами разработан принципиально новый эффективный метод термовакuumной 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, определяющих эффективность таких воздействий, возможность их целенаправленного использования в конкретных технологиях, поиск и обоснование оптимальных режимов обработки по критериям энергосбережения пред-

ставляют научный и практический интерес. На основе комплексного изучения совокупности тепломассообменных и гидродинамических процессов, обеспечивающих высокую эффективность предлагаемого нами метода, 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.

На базе трех машиностроительных заводов Украины было организовано серийное производство аппаратов этого типа (*высокопроизводительных, повышенной производительности*) для предприятий молочной промышленности. Это оборудование используется сегодня в семи различных технологиях производства молочных продуктов.

Эффективность метода официально подтверждена независимыми экспертами ведущих специализированных организаций — Институтом микробиологии им. Д.К. Заболотного НАН Украины, Институтом экогигиены и токсикологии им. Л.И. Медведя МОЗ Украины и Литовским филиалом ВНИИМС.

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

Используемая на предприятиях молочной промышленности технология «Дивэмилк» и массообменное оборудование, реализующее эту технологию, предназначены для обработки натурального молока и жидких молочных продуктов с целью их деаэрации и дезодорации, гомогенизации, снижения кислотности, повышения термостойкости и подавления вредной микрофлоры, что в конечном итоге способствует повышению качественных показателей и существенному улучшению вкусовых характеристик выпускаемой продукции.

*Термостабильность* системы — одно из важнейших качеств, которое определяет возможность последующей переработки сырья и получения качественного продукта в целом. Термостабильность характеризует способность сохранять агрегационную стойкость белков в молоке при воздействии на продукт сравнительно высоких температур. Этот показатель определяет не только качество молока, но и возможность его дальнейшей переработки при производстве молочных продуктов. Основными факторами, которые обеспечивают сохранение термической устойчивости биологической системы являются солевое равновесие и фракционный состав белков. В молоке даже незначительные изменения фракционного состава (в пределах 0,1–1 % от общего содержания белков) могут привести либо к увеличению термостойкости, либо к полной ее потере [3]. Показатель термостабильности в значительной степени зависит от величины титрованной кислотности и от степени бактериального обсеменения исходного молока. Величина титрованной кислотности натурального молока, пригодного для потребления или обработки, должна находиться в пределах 15–19 °Т. Повышение кислотности молока и высокий уровень содержания нежелательной микрофлоры, как правило, приводит к потере термостойкости, что в результате снижает пищевую безопасность продукта. Возможность управления этими показателями с

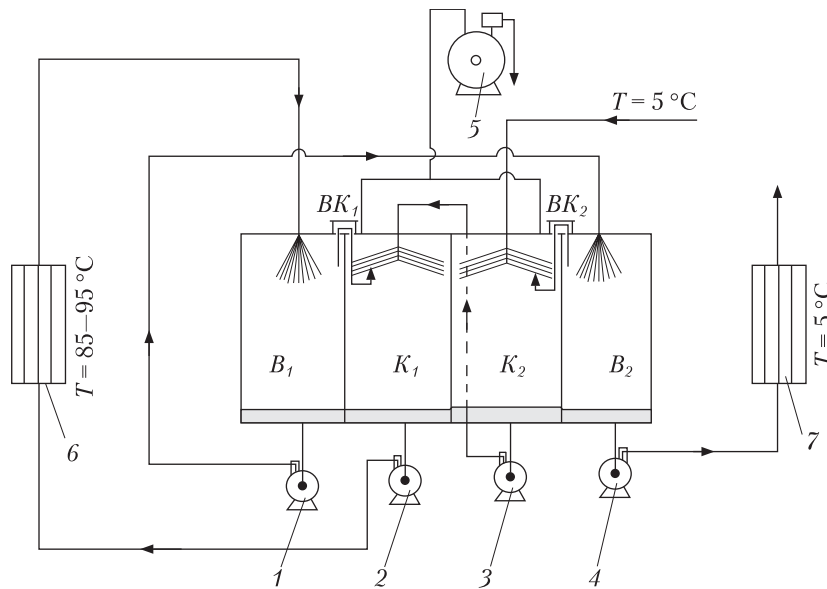
целью повышения качества продукта крайне необходима в производстве.

Установлено, что обработка молока при использовании технологии «Дивэмилк» повышает показатель термостойкости на 1–2 пункта и уменьшает кислотность на 1–3 °Т [4]. Степень изменения этих показателей зависит от качества исходного молока. Так, в молоке с изначально высокой термостойкостью и низкой титрованной кислотностью степень изменения оказывается незначительной, тогда как при обработке молока с низкой термостойкостью и повышенной титрованной кислотностью наблюдаются существенные изменения, обеспечивающие улучшение этих качественных показателей.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ АППАРАТА

Особенности использования аппарата в конкретных технологических схемах определяются специфическими требованиями общей технологической задачи. Поступающее на обработку охлажденное молоко по условиям технологии должно быть нагрето до определенной высокой температуры (например, с целью его пастеризации), а затем снова охлаждено до исходной температуры. Для выполнения оптимальных условий регенерации тепла, лежащей в основе данной технологии, и, соответственно, повышения энергетической эффективности в аппарате реализуется испарительно-конденсационная схема обработки, которая обеспечивает возможность снижения энергетических потерь. Широко используемые сегодня в молочной промышленности аппараты этого типа характеризуются сравнительно небольшими удельными затратами энергии и высокой надежностью в работе. Вместе с тем анализ работы аппаратов в условиях производства показал принципиальную возможность повышения эффективности его работы и снижения непродуктивных энергетических затрат.

Принципиальная схема работы аппарата для термовакuumной обработки жидких сред показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципіальна схема роботи апарата: 1, 2, 3, 4 — центробіжні насоси; 5 — вакуумний насос; 6 — пастеризатор; 7 — холодильник;  $K_1$  і  $K_2$  — камери конденсації,  $B_1$  і  $B_2$  — камери вскипання,  $BK_1$  і  $BK_2$  — соединительні канали I і II ступені відповідно

Апарат складається з двох секцій, кожна з яких включає камеру випаровування  $B$  і камеру конденсації  $K$ . В верхній частині камер встановлені форсунки, забезпечуючі диспергування рідини. Збираюча на дні рідина видаляється з камер за допомогою центробіжних насосів 1–4. В кожній секції апарата камери  $B$  і  $K$  з'єднані між собою каналом, через який пар з камери випаровування поступає в камеру конденсації, так що тиск пари в обох камерах практично однаковий.

Перед початком роботи герметичні камери апарата вакуумуються для повного видалення повітря, так що в процесі роботи тиск в кожній камері рівний тиску насиченого пари при температурі рідини на виході з камери. Початкова холодна рідина з температурою  $T_0 = T_{\min} \approx 5^\circ\text{C}$  через форсунку подається в камеру конденсації  $K_2$  другої секції апарата. Пар, що поступає в камеру  $K_2$  з камери випаровування  $B_2$  через соединительний канал  $BK_2$ , конденсується на краплях холодної рідини, нагріваючи її. З камери  $K_2$  рідина насосом через трубопровід подає-

ся на вхід камери конденсації  $K_1$  першої секції, де пар, що поступає з камери  $B_1$  через канал  $BK_1$ , конденсується на краплях, додатково нагріваючи рідину. З камери  $K_1$  рідина поступає в пастеризатор 6 з температурою  $T_{\text{наст}} = T_{\text{max}}$ , де температура рідини зростає на величину  $\Delta T_1 = T_{\text{max}} - T_{K_1}^{\text{вих}}$ , досягаючи необхідного за умовами технології значення  $T_{\text{max}} = 85 \div 95^\circ\text{C}$ . Після пастеризатора рідина під тиском  $P_{\text{sat}}(T_{\text{max}})$  через спеціальний патрубок поступає в камеру  $B_1$ . Так як тиск в камері  $B_1$  значно нижче  $P_{\text{sat}}(T_{\text{max}})$ , в патрубку відбувається інтенсивне адіабатне кипіння, що забезпечує гідромеханічну обробку рідинної суміші та її диспергування. Тому в камеру  $B_1$  рідина поступає у вигляді факела мелкодисперсних крапель. Через низький тиск пари та високу температуру поступаючої рідини краплі інтенсивно випаровуються з виділенням великої кількості пари. Надлишок пари з камери  $B_1$  переходить через канал  $BK_1$  в камеру  $K_1$ , де конденсується на холодних краплях. З камери  $B_1$  рідина подається в камеру випаровування  $B_2$  для наступного

охлаждения. Избыток пара из камеры  $B_2$  через канал  $BK_2$  перетекает в камеру  $K_2$ , а жидкость насосом подается в теплообменник-холодильник 7, где ее температура снижается на величину  $\Delta T_2 = T_{B_2}^{вых} - T_{min}$ , достигая значения исходной температуры  $T_{min} = T_0 = 5^\circ\text{C}$ . Нейтральные газы (воздух), которые десорбируются из жидкости в процессе ее испарения и адиабатного вскипания выводятся из обеих камер конденсации вакуумным насосом 5.

При использовании данной технологии основные затраты энергии связаны с нагреванием жидкости в пастеризаторе и последующим охлаждением жидкости в холодильнике. Поэтому жидкость на выходе из камеры  $K_1$  перед пастеризатором должна быть достаточно нагретой, а жидкость на выходе из камеры  $B_2$  перед холодильником достаточно охлажденной, с тем чтобы снизить величины перепада температур  $\Delta T_1$  до минимально низких значений и тем самым уменьшить непроизводительные потери энергии. Режим работы аппарата, при котором обеспечиваются условия достижения минимальных значений  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$ , будем называть *идеальным режимом*.

Как показывают расчеты, при идеальном режиме работы двухступенчатой испарительно-конденсационной схемы теоретически достижимые минимальные значения величин  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  однозначно определяются соотношением

$$|\Delta T_{1|min}| = |\Delta T_{2|min}| = (T_{max} - T_{min}) / 3. \quad (1)$$

Проблема оптимизации режимов работы промышленного аппарата по критериям энергосбережения связана с поиском и устранением причин, препятствующих приближению работы аппарата к идеальному режиму.

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ РАСПЫЛЕННОЙ ЖИДКОСТИ С ПЕРЕГРЕТЫМ ПАРОМ В ПРОЦЕССАХ ИСПАРЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ

В соответствии с используемой испарительно-конденсационной схемой регенерации тепла в камерах конденсации обеих секций происходит нагревание жидкости перед ее поступле-

нием в пастеризатор, а в камерах испарения — охлаждение нагретой в пастеризаторе жидкости перед ее подачей в холодильник. Количество теплоты, приобретаемое жидкостью в конденсационных камерах, должно соответствовать количеству теплоты, которая теряется в испарительных камерах. Возможность работы аппарата в оптимальном режиме зависит от того, насколько согласованы условия взаимодействия капель распыленной жидкости с перегретым паром в процессах испарения и конденсации, которые происходят в этих камерах.

Проанализируем особенности теплообмена капель распыленной жидкости с перегретым паром в испарительной и конденсационной камерах одной из секций аппарата, схематически изображенных на рис. 2.

При заданном значении давления  $P_{v_\infty}$  пар считается перегретым, если его температура выше температуры кипения жидкости при этом давлении ( $T_{v_\infty} > T_{кип}(P_{v_\infty})$ ).

Если температура распыленной жидкости на входе в камеру  $T_{k_0} > T_{кип}(P_{v_\infty})$ , то вначале осуществляется нестационарная стадия испарения, которая характеризуется интенсивным парообразованием и чрезвычайно быстрым понижением температуры капель до равновесного значения  $T_k^* > T_{кип}(P_{v_\infty})$ . В последующей равновесной стадии скорость испарения существенно замедляется, а температура капель сохраняет постоянное значение  $T_k^*$ , которое близко к значению  $T_{кип}(P_{v_\infty})$ , но всегда его превышает.

Если на входе в камеру температура жидкости  $T_{k_0} \ll T_{кип}(P_{v_\infty})$ , в начальной стадии происходит нестационарная конденсация пара на холодных каплях, которая сопровождается интенсивным поглощением пара из объема камеры и быстрым возрастанием температуры капель до того же равновесного значения  $T_k^* \approx T_{кип}(P_{v_\infty})$ . При достижении этой температуры нестационарный процесс конденсации переходит в монотонную стадию стационарного испарения капель при строго постоянной температуре  $T_k^*$ , которая в этом случае всегда остается несколько выше значения  $T_{кип}(P_{v_\infty})$ .

На рис. 3 показано, как меняются температура и масса капли воды, помещенной в перегретый пар с заданными параметрами  $P_{v\infty}$  и  $T_{v\infty}$  в случае, когда начальная температура капли  $T_{k_0}$  существенно превышает равновесное значение  $T_{кин}(P_{v\infty})$ , и в случае, когда ее начальная температура намного ниже равновесной температуры. Расчеты выполнены с применением представленной ниже базовой модели для конкретных значений параметров пара и начального размера капли. Видно, что в обоих случаях резкое изменение температуры и массы капель наблюдается в чрезвычайно короткой неравновесной стадии. При переходе к равновесной стадии температура капель остается строго постоянной и близкой к равновесному значению. В обоих случаях в равновесном периоде масса капли медленно убывает благодаря стационарному испарению. Однако в представленном на рисунке сравнительно небольшом временном интервале изменение массы капли практически не заметно.

Условие  $T_{k_0} \gg T_{кин}(P_{v\infty})$  всегда соблюдается в испарительных камерах аппарата, а условие  $T_{k_0} \ll T_{кин}(P_{v\infty})$  — в конденсационных камерах. Поскольку испарительная и конденсационная камеры соединены между собой по паровому тракту через канал ВК, то давление пара  $P_{v\infty}$  в обеих камерах данной секции практически одинаковое. Поэтому жидкость в камере испарения охлаждается до той же равновесной температуры  $T_k^* \approx T_{кин}(P_{v\infty})$ , до которой нагревается жидкость в камере конденсации, и температуры жидкости на выходе из обеих камер должны быть одинаковыми ( $T_B^{вых} = T_K^{вых} \approx T_k^* \approx T_{кин}(P_{v\infty})$ ). Только при выполнении этого условия регенерация теплоты в каждой секции аппарата реализуется в полном объеме.

Очевидно, что это условие будет соблюдаться, если нестационарная стадия испарения (или конденсации) успеет завершиться до того, как капли достигнут дна камеры. В противном случае температура жидкости на выходе из испарительной камеры будет выше равновесного значения ( $T_{kB}^{вых} > T_k^*$ ), а на выхо-

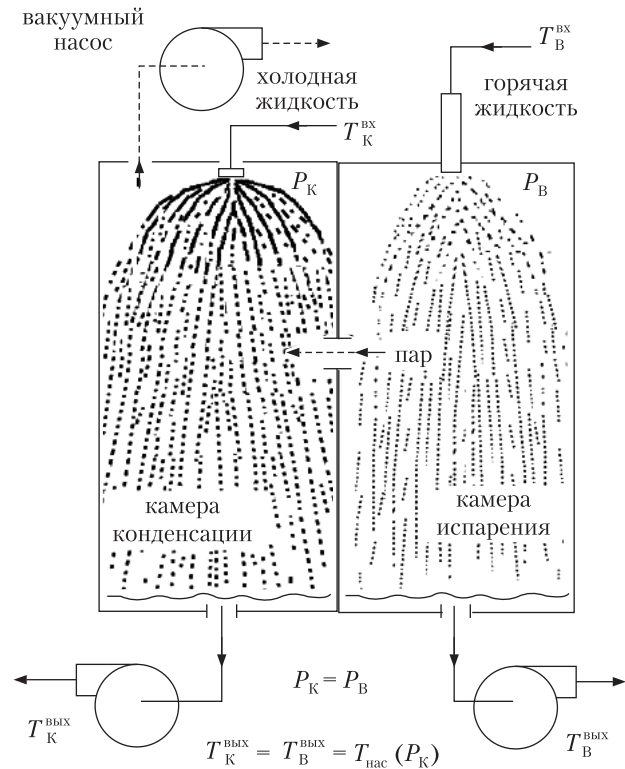


Рис. 2. Принципиальная схема работы испарительной и конденсационной камер одной секции аппарата

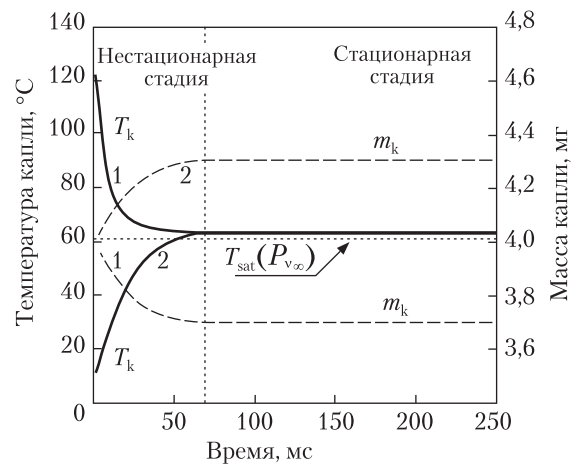
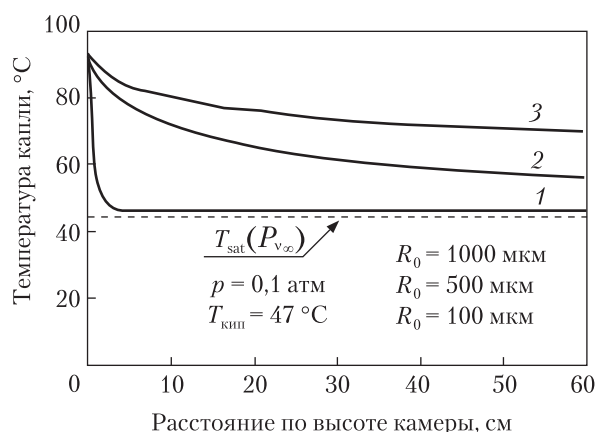


Рис. 3. Изменение температуры  $T_k$  (сплошная линия) и массы  $m_k$  падающей капли в процессе ее испарения (1) или конденсационного роста (2) в среде перегретого пара с давлением  $P_{v\infty} = 20$  кПа и температурой  $T_{v\infty} = 90$  °С,  $T_{кин}(P_{v\infty}) = 60$  °С. Расчет по модели для капель с начальной массой  $m_{k_0} = 4$  мг и начальными значениями температуры  $T_{k_0} = 120$  °С (для горячей капли) и  $T_{k_0} = 10$  °С (для холодной капли). Начальная скорость падения  $v_{k_0} = 1$  м/с



**Рис. 4.** Зависимость изменения температуры капли воды в процессе испарительного охлаждения в камере аппарата от начального диаметра капли. Расчет по модели при условиях  $P_{v\infty} = 10 \text{ кПа}$ ;  $T_{v\infty} = 100 \text{ °C}$ ;  $v_k = 10 \text{ м/с}$  для трех значений начального диаметра капли  $d_k$ : 1 – 0,2 мм; 2 – 1 мм; 3 – 2 мм

де із конденсаційної камери нижче цього значення ( $T_{kB}^{\text{вих}} < T_k^*$ ).

Основной причиной, по которой температура распыленной жидкости за время ее пребывания в камере не успевает достигнуть равновесного значения, является чрезмерно большой размер капель, т.е. недостаточная степень диспергирования жидкости форсунками. За время пребывания в камере крупные капли не успевают охладиться или нагреться до температуры  $T_k^*$  и, кроме того, время падения крупных капель в камере существенно короче по сравнению с мелкими.

На рис. 4 представлены зависимости изменения температуры капель воды в процессе их перемещения в испарительной камере, содержащей перегретый пар под давлением  $P_{v\infty} = 10 \text{ кПа}$ . Расчеты выполнены с применением представленной ниже базовой модели взаимодействия капель с перегретым паром для трех значений начального радиуса капель и при одном и том же значении начальной скорости капель на входе в камеру. На рисунке приведены значения среднеобъемной температуры, поскольку моделирование проведено с учетом градиента температуры в объеме капли. При

высоте камеры 60 см (что соответствует габаритам камер промышленного аппарата производительностью 5 т/ч) до равновесной температуры успевают охладиться только капли с начальным диаметром 0,2 мм. Испарение крупных капель (с диаметром 1 и 2 мм) протекает в неравновесном режиме вплоть до их падения на дно камеры. Видно, что на выходе из камер температура капель заметно выше равновесного значения  $T_k^*$ , которое для рассматриваемого режима равно 45 °C.

Очевидно, что если хотя бы в одной из камер температура падающих капель не успевает достигнуть равновесного значения, схема регенерации реализуется не в полной мере, что приводит, как отмечалось выше, к необходимости дополнительных затрат энергии на подогрев и последующее охлаждение технологического продукта. С другой стороны, продолжительность стадии равновесного испарения, которое протекает без изменения температуры жидкости и не играет никакой роли в схеме регенерации теплоты, должна быть минимально короткой во всех камерах аппарата. Это обеспечивает возможность уменьшения габаритов камер по высоте и снижения металлоемкости аппарата в целом.

Поэтому точная оценка расстояния, пройденного каплями распыленной жидкости к моменту окончания нестационарной стадии процесса испарения (или конденсации), дает возможность оптимизировать конструкцию и размеры аппарата, а также режимы его работы по критериям энерго- и ресурсосбережения.

Для изучения оптимальных условий работы аппарата нами разработана базовая математическая модель, которая позволяет адекватно описать процессы теплообмена и аэродинамики при взаимодействии капель монодисперсного факела распыленной жидкости с перегретым паром, если известны исходные режимные параметры — давление  $P_{v\infty}$  и температура  $T_{v\infty}$  пара, расход жидкости  $G$ , начальные значения радиуса  $R_0$ , температуры капель  $T_{k_0}$  и скорости их падения  $v_{k_0}$ .

Дифференциальные уравнения, описывающие испарение и рост капель при их движении в среде перегретого пара, представлены в следующем виде:

1) изменение радиуса капли:

$$dR/d\tau = -J / 4\pi R^2 \rho_l; \quad (2)$$

2) изменение температуры поверхности капли:

$$dT_s/d\tau = -3(Q + JL) / 4\pi R^3 \rho_l c_l; \quad (3)$$

3) изменение скорости движения капли:

$$dv_k/d\tau = (\rho_l - \rho_v) g / \rho_l - 3\zeta \cdot \rho_v \cdot |v_k| \cdot v_k / 8R \cdot \rho_l, \quad (4)$$

$$\zeta = (24/Re + 3,3/Re^{0,5} + 0,48); \quad (5)$$

4) изменение пути, пройденного каплей:

$$dh/d\tau = v_{d,r}. \quad (6)$$

Система решается при заданных начальных условиях:

$$R(0) = R_0; T_s(0) = T_{s0}; v_k(0) = v_{k0}; h(0) = h_0. \quad (7)$$

Система уравнений модели включает также замыкающие алгебраические уравнения, которые описывают теплообмен и массообмен каплей с паром: скорость массопередачи

$$J = 4\pi R^2 \alpha_m v_s [\rho_{sat}(T_s) - \rho_{v\infty}] \quad (8)$$

и теплопередачи

$$Q = J \cdot c_p (T_s e^b - T_{v\infty}) / (e^b - 1), \quad (9)$$

где  $b = J \cdot c_p / 2\pi R \lambda_v \text{Nu}$ .

С известной поправкой Сполдинга

$$Sp = L/c_p (T_{v\infty} - T_s) \ln(1 + c_p (T_{v\infty} - T_s)/L) \quad (10)$$

число Нуссельта для перегретого пара определяется соотношением

$$\text{Nu} = Sp (2 + 0,6\text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,33}). \quad (11)$$

Здесь  $\rho_l, c_l$  — плотность и теплоемкость жидкости;  $\rho_{sat}$  — плотность насыщенного пара;  $\lambda_v$  — теплопроводность пара;  $L$  — теплота испарения;  $g$  — ускорение гравитации;  $\alpha_m$  — коэффициент конденсации.

С применением модели проведены исследования, целью которых является оценка времени пребывания капли внутри камеры аппарата и расстояния, пройденного каплями в камере

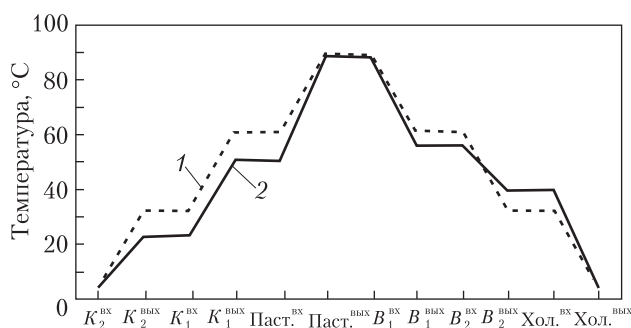
к моменту окончания нестационарной стадии испарения (или конденсации) в зависимости от их размера.

Численные исследования, проведенные с помощью базовой модели, позволили подробно рассмотреть кинетику конденсации пара на каплях (в конденсационных камерах  $K_1$  и  $K_2$ ), кинетику испарения капель (в испарительных камерах  $B_1$  и  $B_2$ ) при их перемещении в среде перегретого пара как в нестационарном, так и в стационарном режимах. Как функции времени или пройденного каплей расстояния определяются текущий радиус капли  $R$ , температура ее поверхности  $T_s$  и среднеобъемная температура  $T_k$ , массовый  $J$  и тепловой  $Q$  потоки через межфазную поверхность, скорость движения капли  $v_k$ , числа  $\text{Re}$  и  $\text{Nu}$ . Установлено, что учет градиента температуры внутри капли оказывает существенную роль при оценке длительности нестационарной стадии, тем более заметную, чем больший начальный размер капли.

Базовая модель положена в основу общей математической модели, которая описывает особенности протекания совокупности взаимосвязанных тепломассообменных, аэро- и гидродинамических процессов одновременно во всех четырех камерах аппарата. В модели учитываются передача тепла и вещества из камеры в камеру по жидкостному и паровому трактам, а также энергетические потери в насосах и трубопроводах и других конструктивных элементах. Модель предназначена для расчета рациональной конструкции и габаритов камер и обоснования выбора распылительных форсунок, обеспечивающих максимальное приближение к идеальному режиму для повышения энергетической эффективности аппарата. На основе этой модели создана аналитическая методика расчета аппарата термовакuumной обработки с заданными технологическими параметрами.

#### АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТА

Был проведен комплексный анализ эффективности аппаратов этого типа производителем



**Рис. 5.** Температура молока на різних етапах його обробки в апараті: 1 — ідеальний режим; 2 — результати експериментальних досліджень

льністю 5 т/ч, які сьогодні широко використовуються на підприємствах молочної промисловості. Експериментальні дослідження проведені на промисловому апараті одного з молочних заводів в умовах виробництва. Результати послужили основою для створення нового обладнання з високою продуктивністю (15–20 т/ч).

С застосуванням високоточних датчиків температури і тиску і з використанням сучасних методів реєстрації і обробки результатів вимірювалася температура рідини (молока) і пари на різних етапах обробки, а також тиск пари і ступінь диспергування рідини в камерах апарату. Дослідження проведені в стандартних технологічних умовах обробки молока: витрата 1,5 л/с, температура рідини на вході в апарат 4 °C; температура рідини на виході з пастеризатора 89 °C. Результати експерименту аналізувалися з допомогою математичної моделі.

Проведені дослідження показали, що при роботі апарату спостерігається систематичний недогрів молока на виході з обох камер конденсації (9÷10 °C) і перегрів в камерах випаровування (5÷8 °C). Це призводить до надмірних втрат енергії на нагрівання продукту в пастеризаторі і на наступне його охолодження в холодильнику після виходу з апарату. Теоретичний аналіз результатів експерименту дозволив оцінити рівень енергети-

чної ефективності апарату і обґрунтувати шляхи її підвищення.

На рис. 5 показано, як змінюється температура молока на різних етапах його обробки в апараті і наведені відповідні розрахункові значення температури при реалізації ідеального режиму, при якому непродуктивні витрати енергії мінімальні. Експерименти показали, що в досліджуваному апараті недогрів молока перед входом в пастеризатор порівняно з ідеальним режимом становить 11 °C, а перегрів його на вході в холодильник — 8 °C. Ці результати свідчать про порівняно високий рівень непродуктивних витрат енергії в промислових апаратах цього типу, використовуваних в технології «Дівамілк», і про існування потенціальних резервів підвищення їх енергетичної ефективності.

Проведемо оцінку рівня енергетичних втрат в досліджуваному апараті, використовуючи результати проведених експериментів.

Величина термодинамічної потужності, яку необхідно витратити для підвищення температури рідини перед пастеризатором на величину  $\Delta T$ , визначається за формулою

$$W = G \cdot c \cdot \Delta T, \quad (12)$$

де  $G$  — продуктивність апарату;  $c$  — удільна теплоємність оброблюваної рідини. За час  $\Delta t$  витрати енергії, пов'язані з додатковим підігрівом рідини в пастеризаторі внаслідок відхилення режиму роботи апарату від ідеального, розраховуються за формулою

$$\Delta E = W \cdot \Delta t = G \cdot c \cdot \Delta T \cdot \Delta t. \quad (13)$$

Аналіз енергетичної ефективності показав, що в апараті продуктивністю  $G = 5$  т/год для підігріву молока перед входом в пастеризатор на 1 °C потрібно витратити потужність, рівну 5,88 кВт. За час роботи апарату витрати енергії на додаткове підвищення температури на 1 °C становлять 5,88 кВт·год, або 5 Мкал. При фіксованому в експеримен-



те недогреве жидкости перед пастеризатором порядка  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  затраты энергии увеличиваются приблизительно до  $60\text{ кВт}\cdot\text{час}$ , или  $50\text{ Мкал}$ .

Принимая во внимание сравнительно невысокие КПД холодильных устройств, используемых в производстве, затраты энергии на дополнительное охлаждение жидкости в холодильнике вследствие отклонения режима работы от идеального при такой же степени перегрева жидкости (порядка  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) должны быть в  $2\text{--}2,5$  раза выше.

Таким образом, анализ эффективности работы промышленного аппарата производительностью  $5\text{ т/ч}$  показал, что суммарные непродуктивные затраты энергии, связанные с отклонением работы от идеального режима составляют примерно  $180\text{ кВт}\cdot\text{час}$ , или  $0,15\text{ Гкал}$ . Это существенно высокий уровень потерь, если принять во внимание, что суммарный расход энергии на работу пяти насосов, используемых в данной технологии, составляет  $27\text{ кВт}\cdot\text{час}$ .

Учитывая, что при повышении производительности с  $5$  до  $15\text{--}20\text{ т/ч}$  потери энергии, связанные с недогревом или перегревом молока на выходе из камер аппарата, увеличиваются пропорционально расходу. Проблема оптимизации работы разрабатываемого аппарата по критериям энергозатрат является весьма актуальной.

Установлено, что основной причиной отклонения работы аппарата от идеального режима является недостаточно высокая степень диспергирования жидкости в камерах конденсации механическими форсунками. Распыление жидкости на входе в камеры испарения осуществляется за счет ее интенсивного дробления в процессе адиабатного вскипания. Это определяет высокую степень диспергирования в этих камерах, благодаря чему средний диаметр капель факела не превышает  $250\text{ мкм}$ . Для организации оптимальной работы аппарата в целом необходимо обеспечить в камерах конденсации столь же высокую степень диспергирования, используя методы механического распыления. При этом температура жидкости на выходе из конденсационной и испарительной

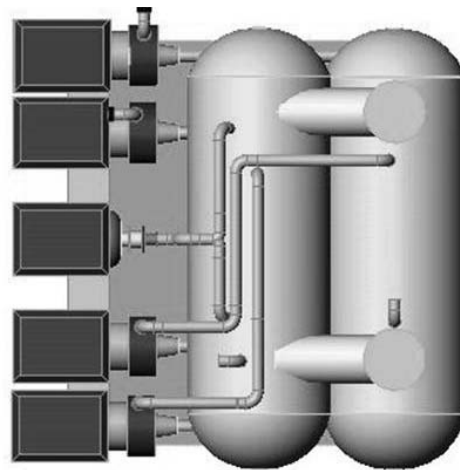


Рис. 6. Одна из возможных схем компоновки опытно-промышленного образца аппарата термовакuumной обработки молока

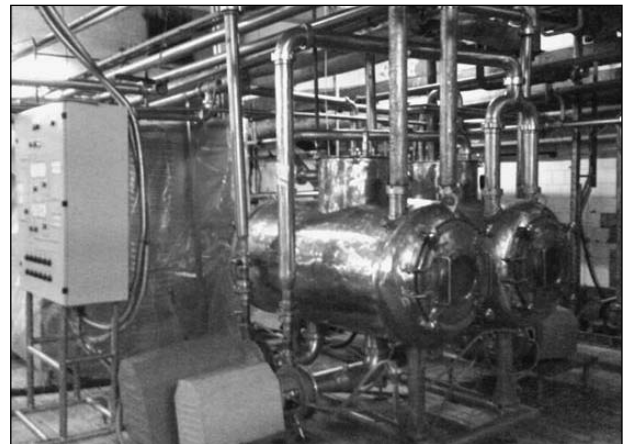


Рис. 7. Аппарат термовакuumной обработки молока в цехе Черниговского гормолзавода

камер каждой секции должна обязательно достигнуть одного и того же равновесного значения, равного температуре кипения при одинаковом давлении пара в камерах. Эти требования определяют выбор оптимального размера камер при выполнении условий минимизации габаритов аппарата и его металлоемкости. Совокупность указанных факторов принималась во внимание при создании аппаратов производительностью  $15\text{--}20\text{ т/ч}$  применительно к их использованию в технологии «Дивэмилк».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований совокупности тепломасообменных, аэро- и гидродинамических процессов, обеспечивающих эффективность технологии «Дивэмилк» в сочетании с практическим опытом многолетней эксплуатации оборудования, позволили разработать исходные требования к новому аппарату.

Была принята следующая схема компоновки аппарата:

1. Аппарат выполняется в виде двух одинаковых горизонтально расположенных цилиндров, каждый из которых разделен внутренней перегородкой на две камеры — испарительную и конденсационную. Оба цилиндра, соответствующие первой и второй ступени аппарата, монтируются на одной раме. Расположение насосов вокруг цилиндрических блоков зависит от выбранного варианта компоновки.

2. Каждый цилиндрический блок состоит из обечайки, двух эллиптических днищ и двух смотровых люков, расположенных в торцах днищ. В верхней части обеих цилиндров расположены клапанные коробки для перехода пара из камер испарения в камеры конденсации.

Был разработан дизайн-проект аппарата. Одна из схем компоновки опытно-промышленного образца данного аппарата представлена на рис. 6.

Опытно-промышленный образец аппарата изготовлен в рамках инновационного проекта Президиума НАН Украины на машиностроительном заводе ВАТ «Полтавамаш» при участии ДП «Милкиленд Украина». Для промышленной эксплуатации аппарат внедрен на Черниговском гормолзаводе в технологической линии производства пастеризованного молока. На рис. 7 представлена фотография аппарата в цехе завода.

К настоящему времени подготовлена документация для серийного изготовления оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Долінський А.А., Іваницький Г.К.* Тепломасообмен и гидродинамика в паро-жидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. — К.: Наук. думка, 2008. — 381 с.
2. *Шурчкова Ю.А.* Адиабатное вскипание. — К.: Наук. думка, 1999. — 278 с.
3. *Горбатова К.К.* Химия и физика белков молока. — М.: Колос, 1993. — 192 с.
4. *Шурчкова Ю.О., Ромоданова В.О., Недбайло А.Є., Целень Б.Я.* Особливості якісних змін білкового складу молока в процесі термовакуумної обробки // Харчова і переробна промисловість. — 2009. — № 1 (353). — С. 25–27.

*А.А. Долінський, Ю.О. Шурчкова,  
Г.К. Іваницький, Б.Я. Целень*

### ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ І ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМОВАКУУМНОЇ ОБРОБКИ МОЛОКА

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

*Ключові слова:* молоко, термовакуумна обробка, краплина, випаровування, конденсація, енергетична ефективність.

*A. Dolinsky, Yu. Shurchkova, G. Ivanitsky, B. Tselen*

### OPTIMIZATION OF HEAT AND MASS-TRANSFER AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE TECHNOLOGY OF MILK THERMOVACUUM PROCESSING

The features of technology of milk and dairy products heat mechanical processing with the use of heat regeneration vaporization condensation scheme is considered. On the basis of experimental and theoretical investigations it has been found the optimum operation conditions for commercial apparatus in use and rational methods of their efficiency improvement were proposed.

*Key words:* milk, thermovacuum processing, droplet, evaporation, condensation, power efficiency.

Надійшла до редакції 16.06.09