

Экспериментальное исследование процесса нагрева молока в вибрационном подогревателе

Канд. техн. наук **Демидов С.Ф.**, demidovserg@mail.ru
д-р техн наук, проф. **Вороненко Б.А.**, voronenkoboris@mail.ru
Демидов А.С., Бажанова И.А. Bi3012@mail.ru
Университет ИТМО
Институт холода и биотехнологий
921002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Проведено исследование процесса нагрева молока в вибрационном подогревателе.

Ключевые слова: термообработка молока, вибрационный аппарат, математическая модель.

Experimental study of heating milk in a vibrating heater

Demidov S.F., Voronenko B.A. voronenkoboris@mail.ru,
Demidov A.S., Bazhanova I.A. Bi3012@mail.ru
University ITMO
Institute of Refrigeration and Biotechnologies
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The investigation of the process of heating milk in a vibrating heater.

Keywords: heat treatment of milk, vibrating machine, a mathematical model.

Основным недостатком работы теплообменного оборудования, используемого в молочной промышленности, является образование пригара на греющих поверхностях. Пригар ухудшает теплотехнические и гидравлические характеристики теплообменных аппаратов, приводит к снижению производительности и эффективности их использования. Удаление пригара требует значительных затрат времени (до 30% рабочего времени), труда, воды, энергии и т.д. Использование в молочной промышленности вибрационного подогревателя полностью исключает пригарообразование [1,2].

Один из методов, используемых для повышения интенсивности теплообмена между рабочим агентом и продуктом, разделенными твердой поверхностью, заключается в том, чтобы оребрить ту сторону поверхности, для которой наблюдается наименьшая теплопроводность, подвергнуть поверхность теплообмена вибрации и создать искусственную турбулизацию потока.

Целью данной работы является определение наилучших параметров проведения нагрева молока в вибрирующей трубке.

Теория теплопередачи через тела, с различными наружными и внутренними поверхностями или при одинаковых граничных условиях (равных температур нагревателей на концах, одинаковых температурных сред, омывающих поверхности

ребер, равных коэффициентах теплопередачи) разработана достаточно полно, и для этого случая имеются надежные формулы, позволяющие выполнять конструкторские и проверочные расчеты теплообменных аппаратов, работающих в указанных или близких к ним условиям.

В действительности, как показывает практика, эти условия не всегда выполняются, а иногда носят резко выраженный несимметричный характер. Например, вследствие неравномерного распределения температур теплоносителя по длине ребренных труб, температура концов ребер становится неодинаковой. Нахождение кинетического уровня, решаемого относительно критерия (числа) Нуссельта и коэффициента теплопередачи, является трудноразрешимой задачей, так как для определения критерия Нуссельта необходимо знать среднетемпературный напор и закон распределения температур между поверхностью теплообменника и продуктом на длине аппарата. Коэффициент теплопередачи зависит также от конструкции теплообменника, термических свойств жидкости, материала, скорости потока продукта, параметров вибрации. При расчете среднего коэффициента теплопередачи на чистой греющей поверхности полученный результат умножают на коэффициент пригарообразования, который колеблется в пределах от 0,08 до 0,2. Вследствие сложной зависимости коэффициента теплопередачи от большого числа факторов невозможно получить расчетное уравнение относительно критерия Нуссельта, пригодное для всех случаев теплового процесса.

Создана физико-математическая модель процесса нагрева молока в вибрирующей трубке при следующих допущениях: коэффициенты теплоотдачи являются постоянными и не зависят от пространственных координат; теплопроводности материалов ребра и трубы не зависят от координат и температуры материала; в основании ребра температуры и тепловые потоки со стороны трубы и со стороны ребра совпадают между собой; жидкость несжимаема, а ее физические свойства постоянны, в потоке отсутствуют внутренние источники теплоты, а теплота трения пренебрежимо мала, течение и теплообмен квазистационарны, т.е. осредненные параметры не изменяются по времени, теплофизические характеристики стенки аппарата остаются постоянными в течение всего процесса термообработки продукта.

Методика исследований процессов термообработки молока в вибрационной трубке предусматривает изучение влияния следующих факторов: массовой скорости движения продукта, температуры продукта на входе и выходе из аппарата, амплитуды и частоты колебаний, геометрических размеров и температуры греющей поверхности.

Для исследования всех перечисленных факторов в вибрационной трубке создавались следующие пределы изменения параметров:

- скорость движения продукта, м/с 0,2 - 0,6;
- температура продукта на входе, °С. 20 - 70;
- температура продукта на выходе, °С. 70 - 95;
- температура теплоносителей на входе, °С. 97 - 105;
- амплитуда колебаний, мм 0,5 - 4;
- частота колебаний, Гц 16 - 86;
- эквивалентный диаметр трубки, м 0,01 - 0,03;

- производительность аппарата, кг/ч

40 - 200.

На основе математической модели процесса нагрева молока и анализа экспериментальных данных получено кинетическое уравнение, решенное относительно среднего времени пребывания продукта в аппарате, достаточное для доведения молока до требуемой техническими условиями конечной температуры. Затем, расписав среднее расходное время пребывания продукта в числе Фурье, получено уравнение относительно производительности вибрационного аппарата:

$$G_{\text{пр}} = 3,113 \times 10^6 \times Re_{\text{ж}}^{0,4} Re_{\text{кол}}^{-1,967} Pr^{-0,54} \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{0,442} \times \left(\frac{Q-Q_0}{t_{\text{ст}}-Q}\right)^{1,1} \times d^{-2} \times 4a \times G_{\text{ап}}$$

(1)

где $Re_{\text{ж}}$ - критерий Рейнольдса ($Re_{\text{ж}} = \frac{VD_1\rho_c}{\mu}$, V - скорость движения продукта по теплообменному аппарату, D_1 - внутренний диаметр теплообменного элемента, μ - динамическая вязкость жидкости, ρ_c - плотность жидкости);

$Re_{\text{кол}}$ - критерий Рейнольдса ($Re_{\text{кол}} = \frac{2\pi nd_1d}{V^2\mu}$, n - частота вращения вала двигателя, d_1 - амплитуда колебаний поверхности);

Pr - критерий Прандтля ($Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$, C_p - теплоемкость жидкости, λ - коэффициент теплопроводности молока);

S_1 ; S_2 - площадь внешнего и внутреннего сечения греющего элемента, соответствует;

Q -температура продукта на выходе из аппарата;

Q_0 - температура продукта на входе из аппарата;

$t_{\text{ст}}$ - температура стенки греющего элемента;

l - длина греющего элемент теплообменника;

d - размер белковой частицы;

a - коэффициент температуропроводности молока;

$G_{\text{ап}}$ - единовременная масса жидкости, находящаяся в теплообменном аппарате.

Точность экспериментальных результатов, рассчитанных по уравнению (4), оценивается средней арифметической ошибкой $\pm 12\%$ от значения рассчитанной величины.

Пределы изменения безразмерных переменных в уравнении:

$$\begin{aligned} Re_{\text{ж}} &= 1,97 - 4,91 \\ Re_{\text{к}} &= 12,94 - 77,66 \\ \frac{Q - Q_0}{t_{\text{ст}} - Q} &= 2,77 - 28,571 \\ \frac{S_1}{S_2} &= 1,89 - 2,04 \\ \frac{D_1}{l} &= 0,0666 - 0,1200 \end{aligned}$$

Анализируя полученную зависимость (1), можно найти экспериментальные значения производительности вибрационного подогревателя.

Пример расчета производительности ($G_{пр}$) вибрационного подогревателя следующий:

1. Задаемся температурой греющей стенки подогревателя.
2. Находим значение производительности ($G_{пр}$) по уравнению (1).
3. Определяем температуру греющей стенки подогревателя по уравнению теплового баланса.

Расчет считаем законченным, когда значения заданной и расчетной температуры греющей стенки совпали.

Рассмотрим графики (рис. 1 и 2) зависимости производительности аппарата от амплитуды колебаний греющей поверхности и частоты вращения вала двигателя вибратора, построенные на основании расчета, выполненного по приведенной схеме.

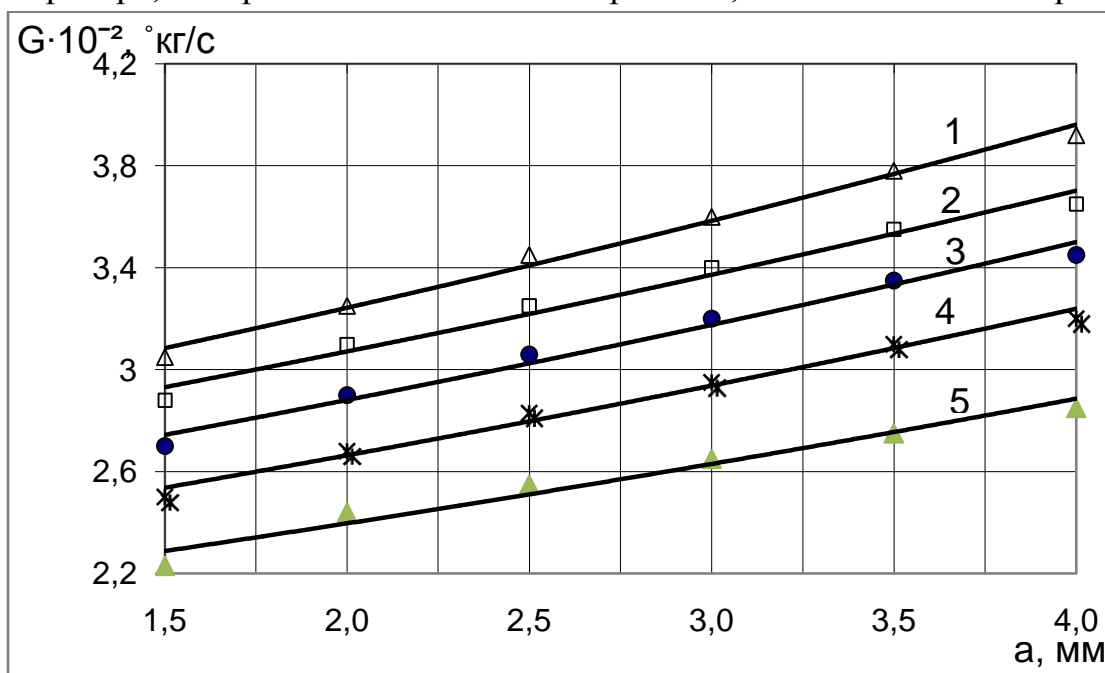


Рис. 1. Зависимость производительности аппарата от амплитуды колебаний греющей поверхности.

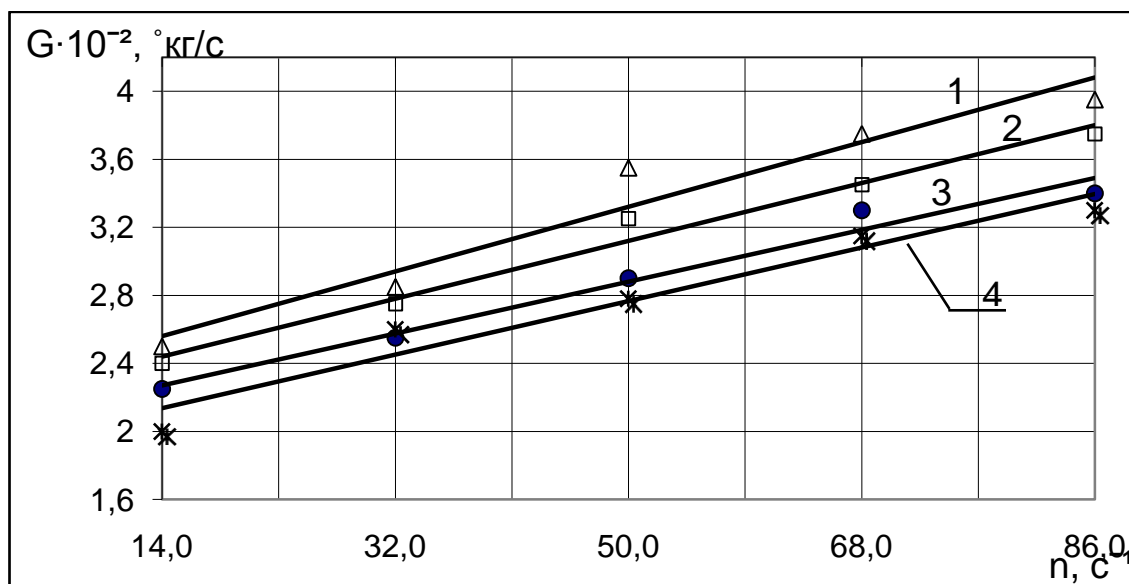


Рис. 2. Зависимость производительности аппарата от частоты вращения вала двигателя вибратора.

Анализ зависимости $G_{пр} = f(a)$ проведен при $D_2=2,2 \times 10^{-2}$ м, $D_1=1,6 \times 10^{-2}$ м, $\pi=50$ 1/с, для $\nu = 0,6$ м/с (кривая 1), $\nu = 0,5$ м/с (кривая 2), $\nu = 0,4$ м/с (кривая 3), $\nu = 0,3$ м/с (кривая 4), $\nu = 0,2$ м/с (кривая 5).

Анализ зависимости $G_{пр} = f(\pi)$ проведен при $D_2=2,2 \times 10^{-2}$ м, $D_1=2,0 \times 10^{-2}$ м, для $\nu = 0,5$ м/с, $a=3,0 \times 10^{-3}$ м (кривая 1), $a=2,5 \times 10^{-3}$ м (кривая 2), $\nu = 0,4$ м/с $a=2 \times 10^{-3}$ м (кривая 3), $a = 2 \times 10^{-3}$ м (кривая 4).

Продукт движется внутри теплообменной трубки, а теплообменная трубка вибрирует вдоль оси. При этом вследствие сложного взаимодействия гофрированных стенок теплообменной трубки с высокотурбулизированным потоком продукта на стенках непрерывно образуются крупномасштабные вихревые образования. Данные вихревые образования срываются со стенок и уходят внутрь потока, обновляя слои продукта у стенок и прогревая внутренние слои, которым продукт, выходящий из вихревых образований, отдает тепло. На место ушедшего слоя, приходит слой с большей кинетической энергией из глубины потока, который догоняет впереди стоящий объем продукта и отрывает его от стенки. В результате подбора гидродинамического режима удается добиться того, что ни одна часть потока не находится длительно у стенки и все время обменивается энергией. Наличие крупномасштабных вихрей приводит к интенсивному перемешиванию продукта и практически мгновенному выравниванию температуры поперек слоя. В случае небольших амплитуд и малых частот образование крупномасштабных вихрей замедленно, они реже срываются и размеры их невелики, скорость движения гофры навстречу потоку мала и все это приводит к тому, что слои у стенки не нагреваются до требуемой температуры. Наоборот, превышение частоты или уменьшение амплитуды ниже критического значения приводит к тому, что размеры вихреобразований становятся также небольшими и отрыв их от стенки замедляется, так как высокотурбулизированный поток прижимает данные вихри к стенке, что ведет к чрезмерному перегреву пристеночных слоев и недогреву внутренних.

Зависимость производительности вихревого подогревателя от диаметра и длины трубы нагревательного элемента представлена на рис. 3.

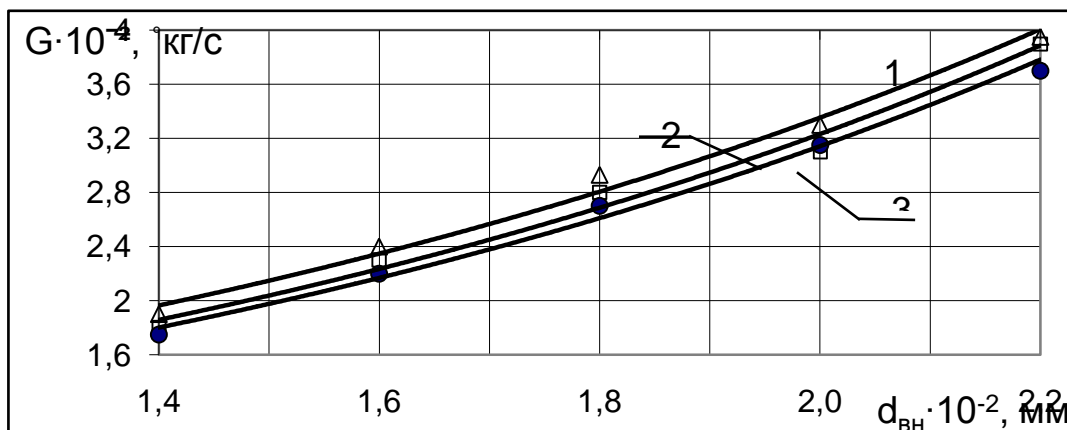


Рис. 3. Зависимость производительности вихревого подогревателя от диаметра и длины трубы нагревательного элемента.

Зависимость производительности подогревателя от скорости движения продукта представлена на рис. 4.

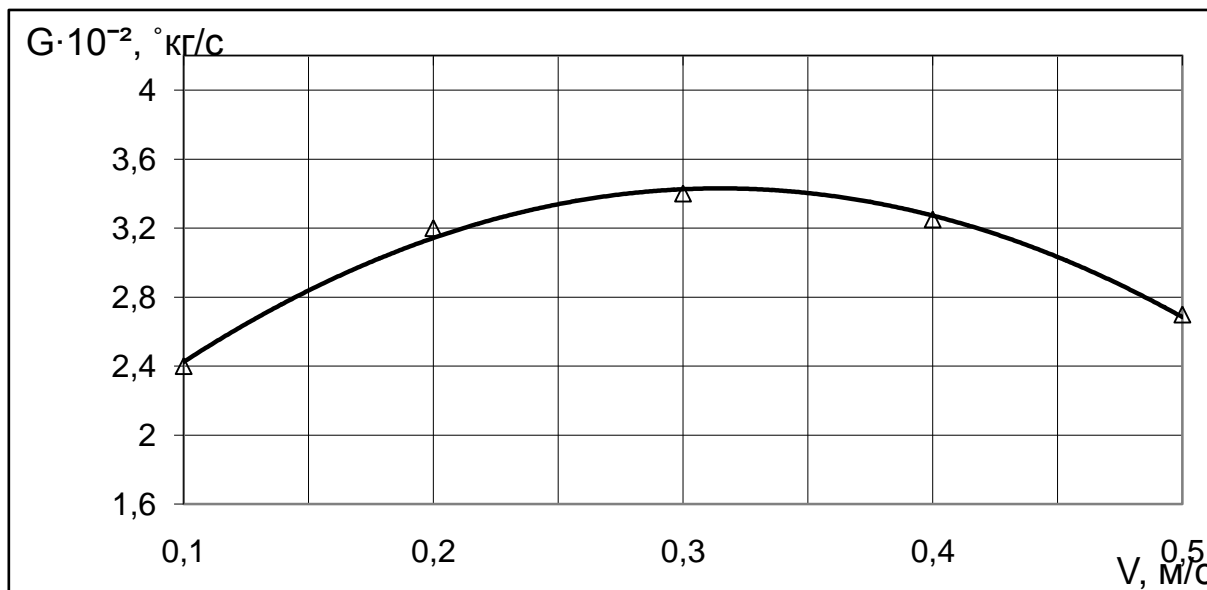


Рис. 4. Зависимость производительности подогревателя от скорости движения продукта.

Анализ зависимости $G_{\text{пр}} = f(d)$ проведем для $a=2 \times 10^{-3} \text{ м}$, $\pi=50 \text{ 1/с}$, для $v = 0,5 \text{ м/с}$ (кривая 1), $v = 0,4 \text{ м/с}$ (кривая 2), для $v = 0,3 \text{ м/с}$ (кривая 3).

Возрастание производительности аппарата подогревателя при увеличении диаметра и длины трубки нагревательного элемента при прочих равных условиях связано с увеличением площади теплообмена.

Анализ зависимости производительности вибрационного подогревателя от скорости движения продукта проведен для $D_2=2,2 \times 10^{-2} \text{ м}$, $D_2=1,6 \times 10^{-2} \text{ м}$, $a=2,5 \times 10^{-3} \text{ м}$, $\pi=50 \text{ 1/с}$.

Уменьшение производительности при скоростях, меньших $0,38 \text{ м/с}$ и больших $0,45 \text{ м/с}$, связано с резким ухудшением условий перемешивания.

Проведено исследование процесса нагрева молока в вибрационном подогревателе.

Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР № 1429361, А 23 L 3/22. Способ нагрева молочных продуктов [Текст]/ Демидов С.Ф., Семенюк В.Н., Мартынов Ю.В., Дубинский Л.Р.: Всесоюзный научно-исследовательский институт комплексного использования молочного сырья и Институт проблем механики АН СССР- №4166429/28-13; заявл. 24.12.86;опубл. 08.06.88, – 4 с.
2. Авторское свидетельство СССР № 1600675, А 23 С 3/03. Устройство для пастеризации молока “Вихрь”[Текст]/ Молочников В.В., Демидов С.Ф., Семенюк В.Н., Малахова Т.А.: заявитель Северо-Кавказский филиал всесоюзного научно-исследовательского института маслодельной и сыродельной промышленности и Институт проблем механики АН СССР. - №3720884/28-13; заявл. 18.04.84;опубл. 23.10.90, Бюл. №39. – 4 с.

Spisokliteratury

1. Avtorskoesvidetel'stvo SSSR № 1429361, A 23 L 3/22.
Sposobnagrevamolochnyhproduktov [Tekst]/ Demidov S.F., Semenjuk V.N.,
Martynov Ju.V., Dubinskij L.R.: Vsesojuznyjnauchno-
issledovatel'skijinstitutkompleksnogoispol'zovanijamolochnogosyr'jaiInstitut problem
mehaniki AN SSSR- №4166429/28-13; zajavl. 24.12.86;opubl. 08.06.88, – 4 s.
Avtorskoesvidetel'stvo SSSR № 1600675, A 23 S 3/03.Ustrojstvodljapasterizaciiimoloka
“Vihr”[Tekst]/ Molochnikov V.V., Demidov S.F., Semenjuk V.N., Malahova T.A.: zajavitel'
Severo-Kavkazskij filial vsesojuznogonauchno-
issledovatel'skogoinstitutamaslodel'nojisyrodel'nojpromyshlennostiiInstitutproblem mehaniki
AN SSSR. - №3720884/28-13; zajavl.18.04.84;opubl. 23.10.90, Bjul. №