УДК 637.133.2.001.24

Зависимость коэффициента теплоотдачи нагрева молока в вибрационном подогревателе от конструктивных параметров

Вороненко Б.А., Демидов С.Ф., Демидов А.С., Поляков С.В.

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий

Определена зависимость коэффициента теплоотдачи в процессе нагрева молока в вибрационном подогревателе от амплитуды и частоты колебаний греющей поверхности, шага выступов и радиуса закругления профиля греющей поверхности.

Ключевые слова: коэффициент теплоотдачи, вибрационный подогреватель, нагрев, молоко, амплитуда и частота колебаний, шаг выступов, радиус закругления.

Данное исследование посвящено изучению зависимости коэффициента теплоотдачи в процессе нагрева молока в вибрационном подогревателе от амплитуды и частоты колебаний греющей поверхности, шага выступов радиуса закругления профиля греющей поверхности [1, 2].

Используя метод математического моделирования, была составлена матрица центрального плана проведения эксперимента. Число опытов в матрице планирования равно 53. Основной уровень, интервалы варьирования переменных и границы области исследования рассчитывались с учетом величины звездного плана $\alpha = 2$.

По экспериментальным данным были рассчитаны коэффициенты уравнений регрессии второго порядка. Значимость коэффициентов проверялось по критерию Стьюдента и после отсева незначимых коэффициентов было получено уравнение в следующем виде:

$$Y = 12217 - 304X_1 + 50{,}3X_2 + 3524{,}7X_3 - 2303{,}9X_4 - 9{,}25X_1X_2 + 374{,}3X_1X_4 - 10{,}91X_2X_3 + 168X_1^2 - 0{,}45X_2^2 - 595{,}5X_3^2 + 506{,}5X_4^2, \quad (1)$$

где Y – коэффициент теплоотдачи в процессе нагрева обезжиренного молока в вибрационном подогревателе, Вт/(м^2/К);

X_1 – значение амплитуды колебаний греющей поверхности, мм;

X_2 – значение частоты колебаний греющей поверхности, 1/с;

X_3 – значение шага выступа профиля греющей поверхности, мм;

X_4 – значение радиуса закруглений профиля греющей поверхности, мм.

Проверка адекватности по критерию Фишера показала, что уравнение адекватно описывает эксперимент.

Влияние каждого из факторов на изменение коэффициента теплоотдачи определялось путем подставления их заданных значений в формулу (1).

На рис.1 представлен график зависимости коэффициента теплоотдачи от амплитуды колебаний греющей поверхности в процессе нагрева обезжиренного молока.

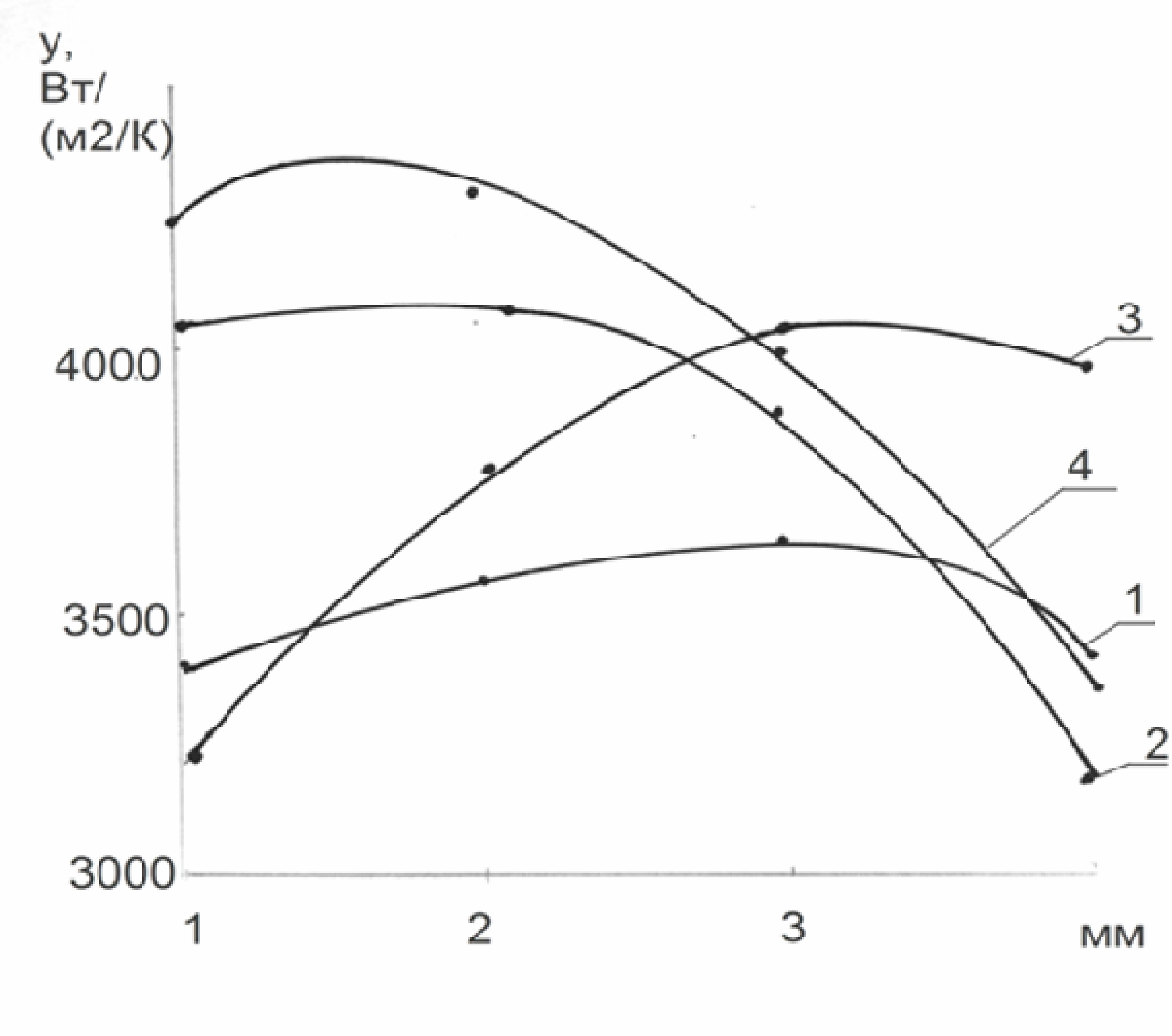

Рис.1

Анализ зависимости проведен для следующих значений параметров уравнения (1):

X_2 = 32 1/с, X_3 = 2 мм, X_4 = 2,5 мм (кривая 1), X_4 = 1,5 мм (кривая 2);

X_2 = 68 1/с, X_4 = 2,5 мм, X_3 = 3 мм (кривая 3), X_3 = 2 мм (кривая 4);

X_2 = 32 1/с, X_3 = 3 мм, X_4 = 1,5 мм (кривая 5).

Как видно из рис.1 коэффициент теплоотдачи в каналах с гофрированными поверхностями при вибрации возрастает монотонно до значений амплитуды колебаний, равной 4 мм, а затем уменьшается.

Качественно характер кривой хорошо согласуется с зависимостью коэффициента теплоотдачи от амплитуды колебаний в гладкостенных теплообменниках [3]. Однако, максимум коэффициента теплоотдачи достигается при существенно меньших амплитудах, что связано с порождением крупномасштабных турбулентных вихрей выступами гофр, которые оказывают на поток влияние, аналогичное порогу, установленному на дне и совершающему возвратно-поступательное движение в одном направлении с потоком. В то время как, в гладкостенных теплообменниках механизм формирования турбулентных вихрей другой, крупномасштабные турбулентные вихри формируются в вязком подслое, при этом прилегающие к стенке сравнительно крупные объемы жидкости имеют низкую скорость, периодически отрываются от стенки и уносятся в глубь потока. Для ускорения данного отрыва требуется существенно большие амплитуды колебаний, в то время как при вибрации выступов, расположенных поперек потока, уже при незначительных колебаниях порождаются интенсивные крупномасштабные вихри, так как при движении навстречу потоку гофры происходит перестройка структуры потока, начинается отток жидкости от стенки в глубь потока, при этом ближайшие к гофре слои замедляются, а движущиеся за ними слои приобретают поперечную составляющую скорости, направленную от стенки. В следующий момент времени гофра движется в обратном направлении, в область между гофрой и замедленными слоями устремляется жидкость над гофрой. В результате того, что жидкость за гофрой движется к стенке, а на значительном расстоянии от гофры в ядро потока, образуются интенсивные турбулентные вихри, которые и приводят к интенсивному перемешиванию потока жидкости. Чем больше амплитуда колебаний, тем больше размеры данных вихревых образований и, следовательно, тем больше коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи достигает максимума при амплитуде колебаний, при которой порождаемые крупномасштабные турбулентные вихреобразования не взаимодействуют друг с другом вблизи стенки, а уносятся вглубь потока и там вызывают интенсивные перемешивания. Как только амплитуда колебаний превысит предельное значение и, следовательно, размеры вихрей достигнут таких величин, что вихри, образованные на смежных гофрах, будут стакиваться друг с другом вблизи стенки и, как следствие, дробиться, терять энергию, то унесенные в глубь потока, образованные из-за дробления, малые вихревые турбулентные образования не в состоянии вызвать интенсивного перемешивания и интенсивность теплообмена снижается, что подтверждается поведением кривой на рис.1.

На рис.2 представлен график зависимости коэффициента теплоотдачи от частоты колебаний греющей поверхности в процессе нагрева обезжиренного молока в вибрационном подогревателе.

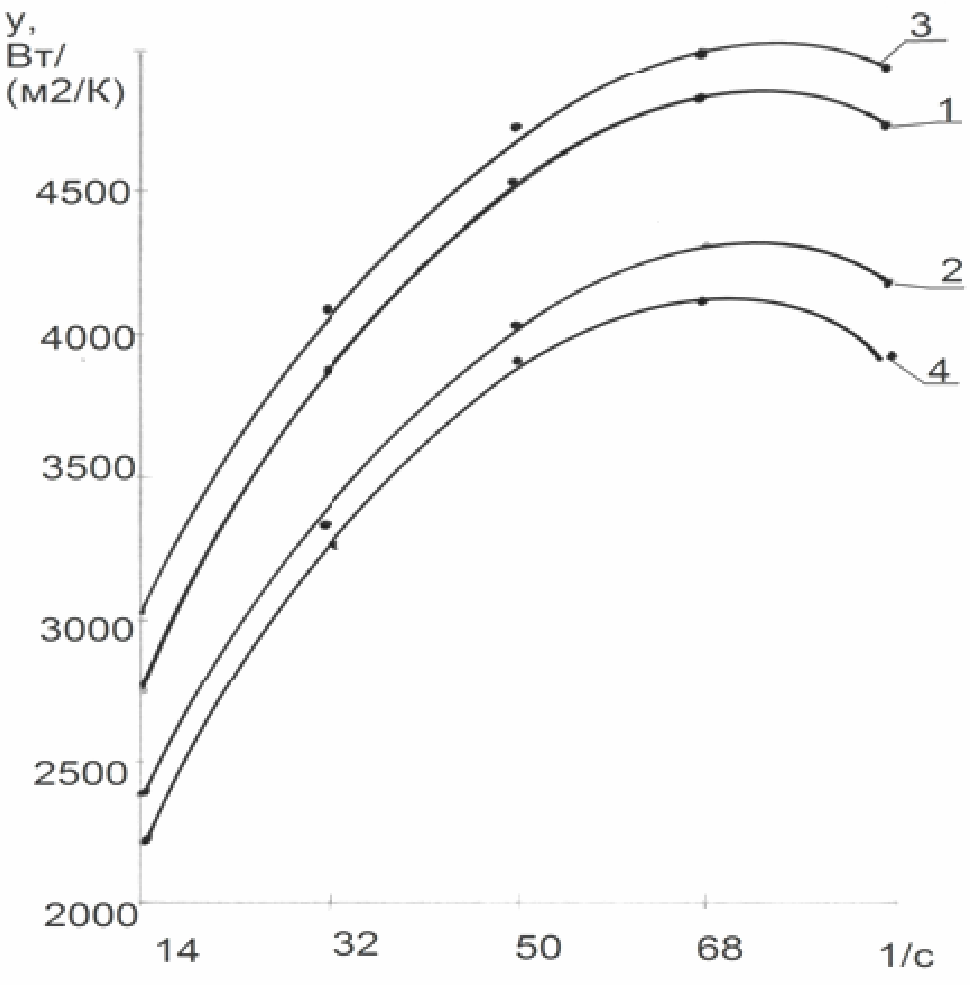

Рис. 2

Анализ зависимости проведен для: X_1 = 3,25 мм, X_3 = 3 мм, X_4 = 2 мм (кривая 1), X_4 = 2,5 мм (кривая 2); X_1 = 1,75 мм, X_3 = 2 мм, X_4 = 1,5 мм (кривая 3); X_1 = 2,5 мм, X_3 = 2,5 мм, X_4 = 2 мм (кривая 4).

Как видно из рисунка, с возрастанием частоты наблюдается монотонное увеличение коэффициента теплоотдачи: при достижении частотой предельного значения, равного $4c^{-1}$, коэффициент теплоотдачи достигает максимального значения, и при дальнейшем возрастании частоты колебаний наблюдается его монотонное убывание. Данная кривая качественно согласуется с результатами экспериментальных исследований для турбулентных струй, в которых также отмечено, что низкочастотные колебания повышают интенсивность турбулентных пульсаций, в то время как высокочастотные колебания уменьшают интенсивность турбулентности и перемешивание жидкости. Увеличение коэффициента теплоотдачи связано с увеличением числа порождаемых в единицу времени турбулентных вихревых образований и, следовательно, с интенсификацией процессов перемешивания потока.

При переходе частоты через критическое значение на первом этапе снижение коэффициента теплоотдачи связано с порождением такого количества турбулентных вихрей, что значительная доля их сталкивается между собой вблизи стенки, дробится на мелкие вихри и процесс перемешивания потока становится менее интенсивным. Однако, при дальнейшем возрастании частоты, до частот, больших 68 c^{-1}, в механизме снижения теплообмена начинает превалировать другой фактор, а именно, время колебания гофр становится меньше характерного времени изменения гидродинамических процессов и крупномасштабные вихревые образования не успевают развиться. Сначала их интенсивность становится меньше, а при дальнейшем росте частоты они вообще не формируются.

На рис.3 представлен график зависимости коэффициента теплоотдачи от шага выступов профиля греющей поверхности.

Анализ проведен для: X_1 = 3,25 мм, X_2 = 68 1/с, X_4 = 2,5 мм (кривая 1); X_1 = 1,75 мм, X_2 = 68 1/с, X_4 = 2,5 мм (кривая 2); X_1 = 3,25 мм, X_2 = 32 1/с, X_4 = 2,5 мм (кривая 3); X_1 = 1,75 мм, X_2 = 32 1/с, X_4 = 1,5 мм (кривая 4).

Увеличение коэффициента теплоотдачи с увеличением шага выступов профиля греющей поверхности связано с увеличением расстояния между выступами гофр, что приводит к созданию крупномасштабных турбулентных вихрей. После достижения расстояния между гофрами критического размера величина турбулентных вихрей с ростом расстояния между гофрами не растет, так как влияние выступа (гофры) на течение жидкости вверх по потоку, зависящее от высоты выступа и радиуса кривизны, достигает своего предельного значения. Так как с ростом расстояния между гофрами число вихревых образований на единице длины теплообменника уменьшается и, следовательно, процесс перемешивания становится менее интенсивным, коэффициент теплоотдачи падает.

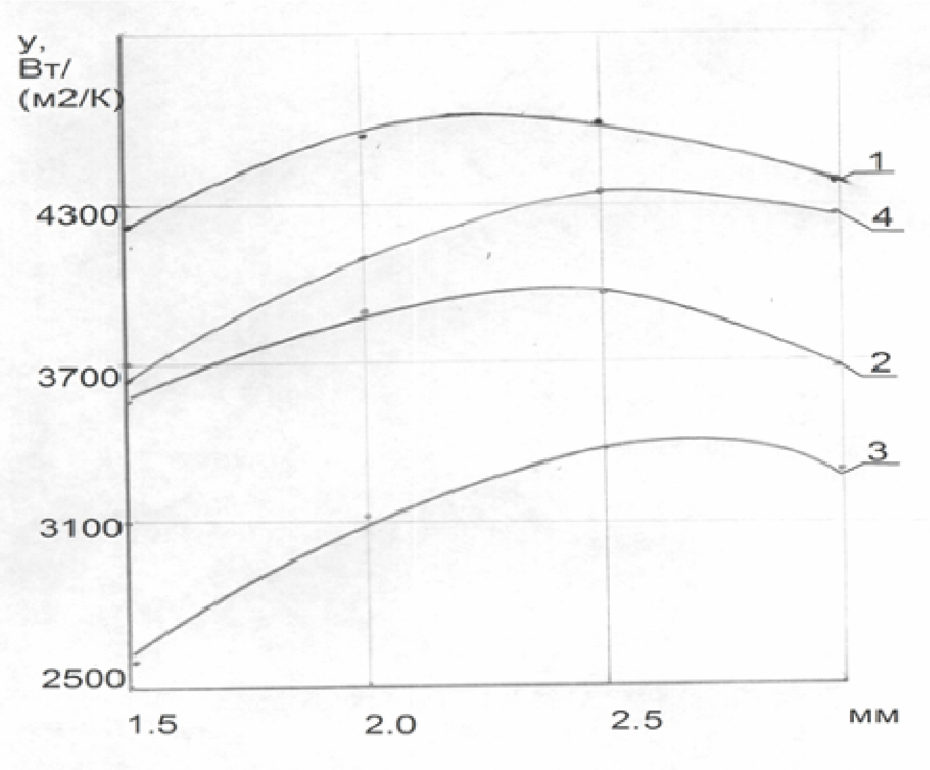

Рис. 3

На рис.4 представлен график зависимости коэффициента теплоотдачи от радиуса закругления профиля греющей поверхности. Анализ проведен для: X_1 = 1 мм, X_2 = 50 1/с, X_3 = 1,5 мм (кривая 1); X_1 = 1 мм, X_2 = 68 1/с, X_3 = 2 мм (кривая 2); X_1 = 1 мм, X_2 = 68 1/с, X_3 = 2,5 мм (кривая 3).

Коэффициент теплоотдачи монотонно возрастает до радиуса закругления, равном 1,5 мм, а затем монотонно убывает.

Следует отметить, что отрыв турбулентных вихрей, образованных во впадинах между гофрами, и унос их в глубину потока играет основную роль в нагреве жидкости, так как образующиеся вихри за это время нахождения между гофрами (между тремя стенками) нагреваются несколько больше, чем остальной поток, и затем нагретый вихрь уносится в глубь потока, передавая ему свое тепло.

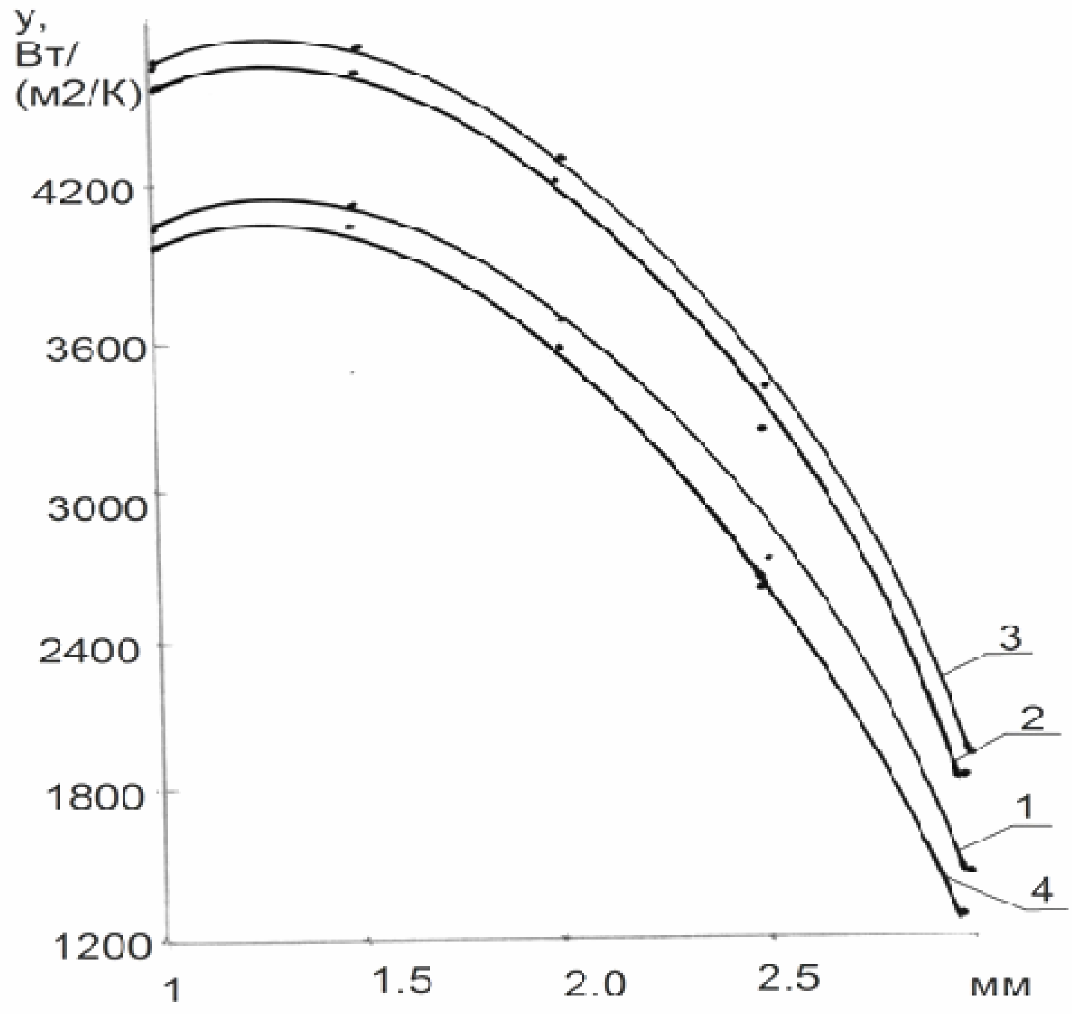

Рис. 4

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.
3. Галицейский Б.И., Рыжов Ю.А., Якуш В.В.Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. М.,”Машиностроение”. – 1977. – 256 с.

Dependence of heat transfer coefficient from milk heated in a vibrating reheater on design parameters

Voronenko B.A., Demidov S.F., Demidov A.S., Polyakov S.V.

Saint-Petersburg State University of Refrigeration
and Food Engineering

In the process of heating milk in a vibrating reheater there has been determined the dependence of heat transfer coefficient on amplitude and frequency vibrations, projection spacing and profile curve radius of the heating surface.

Keywords: heat transfer coefficient, vibrating reheater, heating, milk, amplitude and frequency vibrations, projection spacing, curve radius.