

ISSN 2074-1146



ТЕХНИКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СЕРВИСА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
издается с 2007 года

№ 1 (39), 2017



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОТОЧНЫХ АППАРАТАХ С ОЧИЩАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В.А. Арет¹, В.В. Пеленко², А.Ю. Круподеров³

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (НИУИТМО), 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49.

Изучена экспериментально и математически описана работа специального аппарата с очищающимися поверхностями теплообмена обработки молочных продуктов.

Ключевые слова: Перемешивание, теплообмен, молочные продукты

STUDY OF THE RHEOLOGICAL AND THERMAL PROCESSES IN THE APPARATUS IN-LINE WITH THE SURFACE BEING CLEANED

A.V. Aret, V.V. Pelenko, A. J. Krupoderov,

Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 197101, St. Petersburg, Kronverkskiy pr., 49.

Studied experimentally and mathematically describe the operation of the special device on the cleaning surface heat treatment of dairy products

Keywords: Mixing, heat transfer, dairy products

Известен способ интенсификации теплообмена при обработке вязких пищевых продуктов путем перемешивания обрабатываемой среды специальными рабочими органами, обеспечивающими очищение поверхности теплообмена. Однако тематика остается актуальной, хотя в этой области проведен ряд обширных исследований [1,2,3,4]. Необходима более глубокая проработка отдельных аспектов этого способа, особенно при осуществлении тепловой обработке вязких сред с неньютоновскими свойствами, склонных к пригоранию, например, некоторых высоковязких молочных продуктов.

Математической основой процесса теплообмена является следующее дифференциальное уравнение [5]:

$$\delta t / \delta \tau = \alpha \delta^2 t / \delta y^2, \quad (1)$$

где: y – расстояние от стенки; τ – время; t – температура среды; α – коэффициент теплоотдачи. Граничными условиями являются: $t = t_{ст}$ при $y = 0$ и $\tau > 0$, $t = t_0$ при $y > 0$ и $\tau = 0$. Однако эта теоретическая модель не учитывает ряд существенных практических обстоятельств, влияющих на процесс, как то кривизну поверх-

ности, периодичность проход скребка, неньютоновскую природу вязкости ряженки и многих других пищевых продуктов. С целью экспериментальных исследований были изготовлены несколько экспериментальных установок [6, 7,8].

Новое устройство позволило проведения дальнейших экспериментальных исследований теплообмена и расходуемой энергии при обработке ряженки жирностью 2,5%. Исследования затрагивают изменение значений критерия Рейнольдса в диапазоне от 90,7 до 6380, при этом значения эффективной вязкости наблюдались в диапазоне от 0,03 до 0,14 Па·с. Это позволяет применять полученные данные для расчёта процессов в оборудовании для различных отраслей пищевой промышленности. Для применения полученных данных к более широкому спектру оборудования и обрабатываемых сред, с учетом теории подобия было предложено критериальное уравнение теплообмена для ньютоновских и неньютоновских жидкостей учитывающее симплексы подобия.

¹Арет Вальдур Аулисович – доктор технических наук, профессор НИУИТМО, e-mail: valdurtera@rambler.ru;

²Пеленко Валерий Викторович – доктор технических наук, профессор НИУИТМО, e-mail: pelenko1@rambler.ru;

³Круподеров Алексей Юрьевич – аспирант НИУИТМО, e-mail: a.lex.k@mail.ru

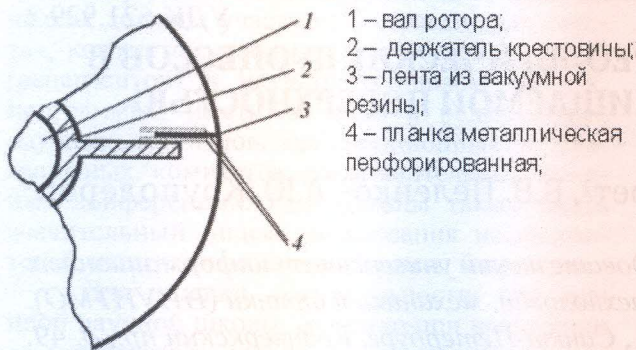


Рисунок 1 – Схема экспериментального скребкового устройства

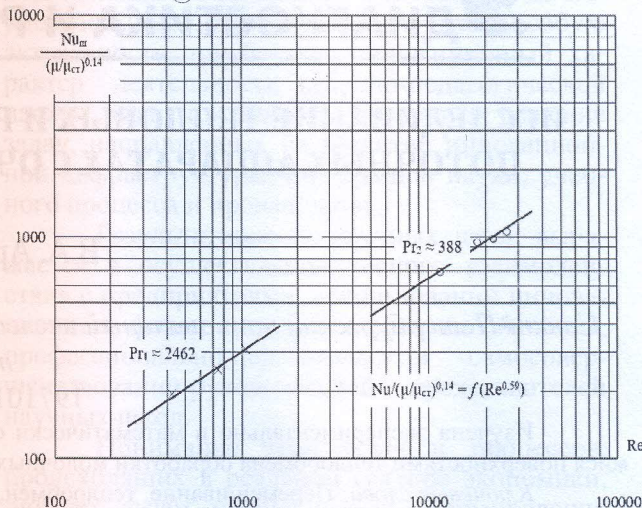


Рисунок 2 – Зависимость критериев Нуссельта и критерия Рейнольдса в аппарате с перемешивающими устройствами – определение показателя степени критерия Рейнольдса

$$Nu = B \cdot Re^a \cdot Pr^b \cdot (\mu/\mu_{ст})^{0,14}, \quad (2)$$

где: $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ – критерий Нуссельта; $Re = \frac{\omega \cdot l \cdot \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса; $\omega = \pi \cdot D \cdot n$ – скорость рабочей кромки скребкового устройства, м/с; $Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}$ – критерий Прандтля; $l = \pi \cdot D/z$ – характерный размер представляющий собой расстояние между внешними кромками очищающих устройств, м; D – внутренний диаметр аппарата, м; z – число лопастей перемешивающего устройства, шт; μ и $\mu_{ст}$ – эффективная вязкость продукта при средней температуре продукта и при температуре стенки соответственно, Па·с; B – эмпирический коэффициент; a, b – безразмерные коэффициенты, определяемые в ходе экспериментов.

Применение в расчетах величины l , представляющей собой расстояние между кромками лопастей перемешивающего устройства, позволяет учитывать влияние количества скребков и внутреннего диаметра рабочего цилиндра.

Показатель степени критерия Рейнольдса был определен в результате обработки полученных экспериментальных данных в логарифмических координатах:

$$\lg\left(\frac{Nu}{(\mu/\mu_{ст})^{0,14}}\right) = f(\lg(Re)). \quad (3)$$

Исследование проводилось для групп опытов, критерий Прандтля в которых составлял: $Pr_1 = 388$ $Pr_2 = 2462$.

Графоаналитическая обработка полученных зависимостей, представленных на рисунке 2, показала, что обе группы опытов имеют одинаковый наклон к оси абсцисс. Показатель степени a формулы (2) определен как тангенс угла наклона графика к оси абсцисс и равен $a = 0,59$. Значение показателя степени говорит о значительном влиянии критерия Рейнольдса на теплообмен.

Аналогичным образом было определено влияние критерия Нуссельта на теплообмен. В полученной графической зависимости используется коэффициент критерия Рейнольдса полученный на предыдущем шаге.

$$\lg\left(\frac{Nu}{Re^{0,59} \cdot (\mu/\mu_{ст})^{0,14}}\right) = f(\lg(Pr)). \quad (4)$$

В результате графоаналитической обработки опытных данных, была установлена величина показателя степени для критерия Прандтля для формулы (2) $b = 0,37$.

Для получения коэффициента B формулы (2) производится математическая обработка данных на основе зависимости (5):

$$\lg\left(\frac{Nu}{Pr^{0,37} \cdot (\mu/\mu_{ст})^{0,14}}\right) = f(\lg(Re)). \quad (5)$$

В результате проведенных опытов и математической обработки опытных данных критерическое уравнение (2) принимает вид:

$$Nu = 0,923 \cdot Re^{0,59} \cdot Pr^{0,37} \cdot (\mu/\mu_{ст})^{0,14}. \quad (6)$$

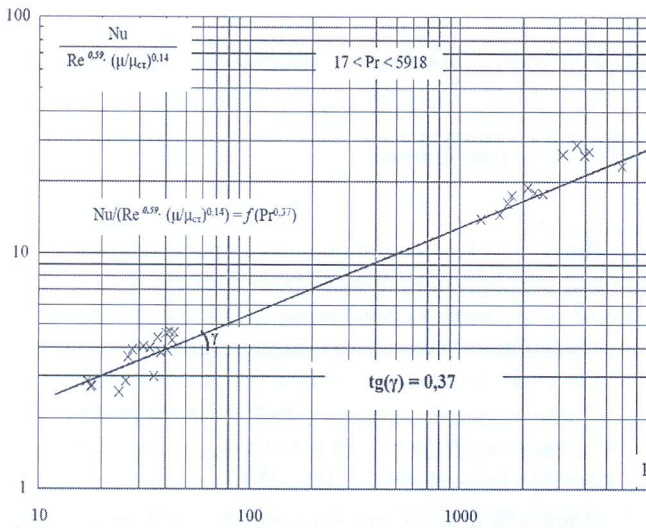


Рисунок 3 – Определение показателя степени критерия Прандтля

Важными показателями теоретического описания процессов, осуществляемых значительном количестве аппаратов пищевой промышленности, являются изменяемые во времени параметры ряда технологических процессов. Распространённым примером подобных нестационарных процессов можно рассматривать пусковые режимы машин и аппаратов. Нестационарные режимы работы ведут к отклонению параметров течения, влияют на теплопередачу в теплообменном оборудовании, могут привести к заметным изменениям в ходе массообменных и химических процессов. Во многих случаях следует учитывать влияние особенностей пускового режима, так как отсутствие этого приводит к неточности измерений, а также к ошибкам при выборе режимов работы оборудования. Таким образом, оценка особенностей пускового режима необходима.

Для исследования пусковых режимов использовалась установка, представленная на рисунке 4. Она представляет собой модифицированный реометр, оснащённый устройствами для измерения частоты вращения ротора. Помимо этого, модификация включала в себя применение альтернативных внешних цилиндров и установку на цилиндр ротора устройств, моделирующих скребковое воздействие. Опыты заключались в измерении зависимости частоты вращения ротора от времени с момента пуска, при этом на ротор воздействовал постоянный момент. Была проведена серия опытов с внешними цилиндрами радиусом 19 мм, 34 мм и 72 мм при радиусе внутреннего цилиндра 16 мм. В качестве модельной среды использовалась ряженка жирностью 2,5% как образец пищевого продук-

та с неньютоновскими свойствами и глицерин концентрацией 99,5% представляющий собой среду с ньютоновскими свойствами. Использование глицерина обусловлено в частности его хорошо известными физическими характеристиками.

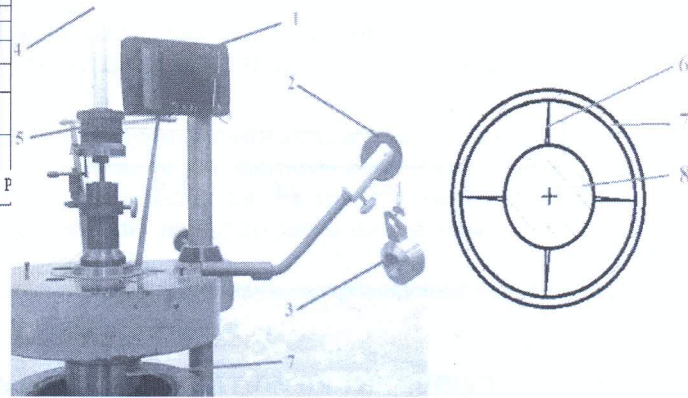


Рисунок 4 – Экспериментальная установка, использованная для исследования пусковых режимов в аппаратах с очищающими устройствами: 1 – цифровой бесконтактный тахометр; 2 – блок; 3 – груз; 4 – метка для тахометра; 5 – шкив; 6 – скребковое устройство; 7 – ёмкость статора; 8 – цилиндр ротора

Полученные при исследовании пускового режима данные имеют характер близкий к экспоненциальной зависимости (рисунок 5), их можно описать в виде формулы (7), коэффициенты a и b в этой формуле определены путём обработки данных с помощью программы CurveExpert.

$$\Omega = a(1 - e^{b\tau}), \quad (7)$$

где: Ω – частота вращения ротора, c^{-1} ; a и b – эмпирические коэффициенты:

$a = 0,626 \cdot 10^{-1}$; $b = 5,32$ – для ряженки жирностью 2,5% коэффициент корреляции: $R=0,964$; среднеквадратичное отклонение $\delta=0,0607$.

Для глицерина концентрацией 99,5%: $a = 0,814$; $b = 5,89$; коэффициент корреляции: $R=0,957$; среднеквадратичное отклонение $\delta=0,0425$.

Выводы

1. Определено влияние критериев Рейнольдса и Прандтля на теплообмен в аппарате. Для скребковых устройств с отверстиями наблюдалось повышение критерия Рейнольдса на 3÷5 % по сравнению с замерами, проведёнными для устройств без отверстий.

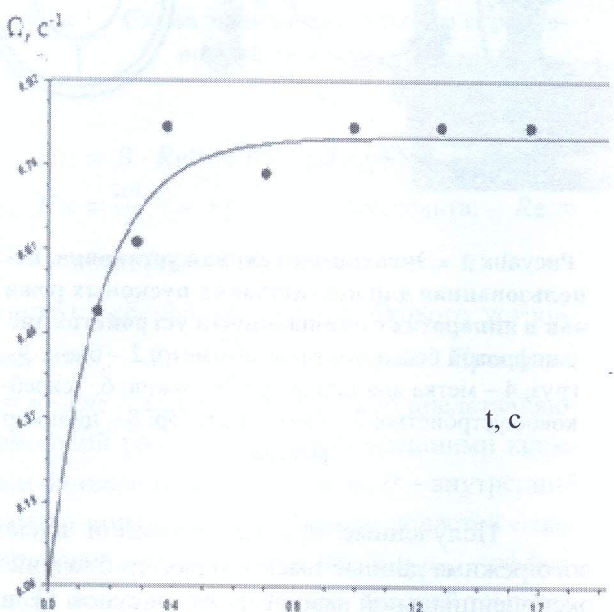
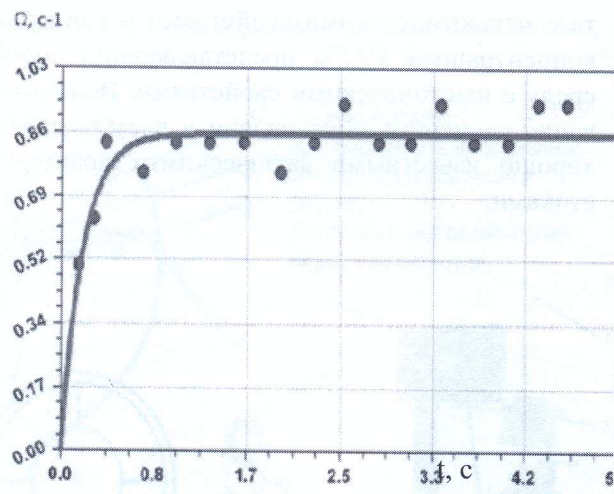


Рисунок 5 – Зависимость частоты вращения ротора от времени с момента пуска для ряженки жирностью 2,5% и для глицерина концентрацией 99,5%

2. Установлена правомерность описания характеристик пускового режима с использованием экспоненциальной зависимости вида $\Omega = a(1 - e^{-bt})$.

3. Установлено преобладание влияния на пусковой режим плотности среды по сравнению с влиянием вязкостных свойств. Значение коэффициента экспоненты b отличалось на

8÷15% для замеров с ряженкой и глицерином при соблюдении прочих равных условий.

Литература

1. Николаев Л.К. Закономерности процессов тепловой обработки пищевых продуктов с аномально-вязкими свойствами в аппаратах с очищаемой поверхностью автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Ленинградский ордена Трудового Красного Знамени технологический институт холодильной промышленности. Ленинград, 1985
2. Николаев Б.Л. Развитие научных основ интенсификации гидродинамических и тепловых процессов при обработке жиросодержащих пищевых продуктов в ёмкостном оборудовании с перемешивающими устройствами. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий. Санкт-Петербург, 2009
3. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. – Л.: Химия, 1975.–484 с.
4. Николаев Б.Л. Научное обоснование и совершенствование ёмкостного оборудования для вязких пищевых продуктов // Вестник Международной академии холода, 2007.- No4.- с.35-38.
5. Базаров И. П. Заблуждения и ошибки в термодинамике. — Изд. 2-е испр. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 120 с.
6. Круподеров А.Ю., Ахмедов М.Х., Мерцкая А.А., Идрисов Н.И. Экспериментальный стенд на базе ротационного вискозиметра для исследования пускового режима оборудования // Научный альманах. – Тамбов.: 2015 – № 10-3 (12) С.150–153.
7. Николаев Л. К., Николаев Б. Л., Круподёров А. Ю., Кузнецов А.В. Экспериментальная установка для исследования тепловых процессов в поточных аппаратах с очищающими устройствами // Эл. научный журнал «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. №1. С.7–14
8. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции: Учебное пособие с грифом УМО / В. А. Арет, Б. Л. Николаев, Л. К. Николаев. - СПб.: ГИОРД, 2009. - 537 с.