

УДК 621.56

## **Экспериментальная установка для исследования тепловых процессов в поточных аппаратах с очищающими устройствами**

*Д-р техн. наук, Николаев Б.Л., Круподёров А.Ю., Кузнецов А.В.,  
д-р техн. наук, проф. Николаев Л.К., Денисенко А.Ф., Дудина А.А. lev.nikolaew.@yandex.ru*  
*Университет ИТМО*  
*Институт холода и биотехнологий*  
*921002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*В статье дано описание экспериментальной установки поточного аппарата имеющего очищающие устройства, которые движутся по теплообменной поверхности. Установка предназначена для исследования тепловых процессов на стороне обрабатываемой среды в поточных аппаратах с очищаемой поверхностью. Авторы приводят описание экспериментальной установки, методику проведения исследований и вид математических зависимостей с целью получения расчетных формул в критериальном виде. Дается описание специфических особенностей обработки пищевых продуктов с неньютоновскими псевдопластичными свойствами в поточных аппаратах с очищаемой поверхностью. Отмечается значительный расход энергии при обработке вязких продуктов. Приводится перечень приборов, входящих в состав экспериментальной установки.*

*Ключевые слова:* теплоотдача, очищающие устройства, вязкость, реология, поточные аппараты.

---

## **Experimental installation for research of thermal processes in flow-line phones with purifying devices**

*Nikolaev B.L., Krupoderov A.U., Kuznecov A.V., Nikolaev L.K., Denisenko A.F.,  
Dudina A. A. lev.nikolaew.@yandex.ru*  
*University ITMO*  
*Institute of Refrigeration and Biotechnologies*  
*191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

*The article describes the experimental setup flow apparatus has a purifying device, which move on the heat exchange surface. Installation is intended for investigation of thermal processes on the side of the processable environment in continuous devices to the surface. The authors give the description of the experimental setup, methodology of research and views of mathematical dependencies to obtain calculation formulae in criteria-based form description of the specific features of the processing food products with non-Newtonian pseudoplastic properties in continuous devices to the surface. There is a significant power consumption when processing viscous products. Provides a list of the devices included in the experimental setup.*

*Key words:* heat dissipation, purifying device, viscosity, rheology, production machines.

---

Многие пищевые продукты имеют большую вязкость и обладают свойствами неньютоновской среды с псевдопластичными свойствами [1-7].

Осуществление процессов нагревания и охлаждения сред с большой вязкостью издавна является серьёзной проблемой в промышленности [8]. Поэтому разработка новых конструкций теплообменных аппаратов, применяемых для обработки вязких продуктов возможна только на основе данных, полученных при всесторонних исследованиях процессов, протекающих в этих аппаратах [9].

Тепловая обработка пищевых продуктов, и в особенности высокожирных, нередко осуществляется сравнительно медленно. При этом в зависимости от вида тепловой обработки и обрабатываемого сырья, на теплопередающей поверхности могут образовываться застывший или пригоревший слой продукта. Чтобы интенсифицировать протекание тепловых процессов при обработке высоковязких сред их обработку осуществляют в аппаратах со скребковыми мешалками [10-17].

Тепловая обработка вязких пищевых продуктов связана со значительными расходами энергии на их перемешивание [18]. Поэтому, количество тепла перешедшего к продукту в результате диссипации энергии достаточно велико и оказывает заметное влияние на протекание тепловых процессов. При этом, если в аппарате продукт нагревается, то тепло диссипируемой энергии сокращает продолжительность тепловой обработки его, а при охлаждении продукта с учётом диссипируемой энергии продолжительность тепловой обработки увеличивается.

Экспериментальная установка для исследования тепловых процессов в аппарате с очищающими устройствами состоит из модели поточного аппарата с очищаемой поверхностью, сборного бака с лопастной мешалкой, потенциометра, трёх автотрансформаторов, двух электродвигателей постоянного тока, электродвигателей переменного тока, сосуда для холодного спая, выпрямителей тока, трубчатых электронагревателей – ТЭНов, переключателя термодпар, шестерённого насоса и червячного редуктора с муфтой.

Аппарат состоит из рабочего цилиндра, вала с очищающими устройствами и охлаждающей рубашки, имеющей снаружи слой изоляции. В стенке рабочего цилиндра вдоль всей длины его заделаны термодпары, размещённые равномерно по периметру. Термодпары установлены также на входе и выходе обрабатываемой среды из аппарата. Кроме того, на входном и выходном патрубках для обрабатываемой среды, а также на входном и выходном патрубках для хладоносителя установлены термометры. В электрическую цепь электродвигателя постоянного тока включены ваттметры и вольтметры. Для измерения избыточного давления на входном патрубке для модельной жидкости установлен манометр. При изготовлении установки учтены рекомендации, что в работе [19].

Методика проведения исследований следующая. До начала проведения исследований обрабатываемая среда нагревается в баке, посредством ТЭНов, до требуемой температуры. Поддержание температуры жидкости в заданных пределах обеспечивается путём изменения напряжения, подаваемого на один из ТЭНов, через автотрансформатор. Остальные ТЭНовы включаются в нужном количестве в зависимости от интенсивности теплообмена в исследуемом аппарате. Для обеспечения равномерной температуры обрабатываемой среды в баке по всему объёму его, жидкость постоянно перемешивается мешалкой, привод которой размещён на крышке бака.

Модельную жидкость заданной температуры шестерённым насосом из бака подают в рабочую полость исследуемого аппарата, образованную внутренней поверхностью рабочего цилиндра и наружной поверхностью вала с очищающими устройствами. При протекании обрабатываемой среды в рабочей полости аппарата осуществляется перемешивание её очищающими устройствами, размещёнными на валу. Из аппарата обрабатываемая среда по трубопроводу возвращается в бак. Рабочая жидкость, пройдя через рубашку аппарата, направляется в сливную трубу.

Температура обрабатываемой среды на входе и выходе из аппарата, а также разность температур её измеряется термопарами. Кроме того, температуру обрабатываемой среды на входе и выходе из аппарата, а также температуру входящей и выходящей рабочей жидкости из рубашки аппарата, измеряют лабораторными термометрами с ценою деления  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Температуру стенки рабочего цилиндра аппарата измеряют с помощью термопар.

Показания термопар фиксируют потенциометром. Материал термопар медь-константан. Привод вала с очищающе-перемешивающими устройствами и привод шестеренного насоса осуществляется от автономных электродвигателей постоянного тока, что даёт возможность изменять, как частоту вращения вала, так и производительность насоса в широком диапазоне.

При изотермическом течении обрабатываемой среды в аппарате, в рубашку его не подают рабочую жидкость, а при неизотермическом течении – рабочий цилиндр аппарата снаружи обогревают или охлаждают путём подачи тепло-или хладоносителя в рубашку аппарата.

В качестве модельных жидкостей целесообразно применять водно-глицериновые растворы.

При проведении исследований, наряду с модельными средами необходимо использовать вязкие пищевые среды с неньютоновскими псевдопластичными свойствами.

Конструкция вала позволяет устанавливать на нём скребковые устройства с различным числом рядов очищающих устройств на валу, а также с различным числом отверстий в пластинах очищающих устройств. Мощность, расходуемая очищающе-перемешивающими устройствами на перемешивание обрабатываемой среды необходимо рассчитывать по разности общей расходуемой энергии и энергии холостого хода.

Для замера энергии, расходуемой на перемешивание обрабатываемой среды в аппарате, к электродвигателю постоянного тока подсоединён ваттметр, а для контроля напряжения в обмотках электродвигателя в электрическую цепь включён вольтметр. Производительность шестеренного насоса изменяется посредством другого электродвигателя постоянного тока. Определение расхода обрабатываемой среды осуществляется весовым способом с использованием для её взвешивания электронных весов типа 15ЭВ. Продолжительность наполнения мерной ёмкости определяется с использованием двухстрелочного секундомера. Частота вращения вала с очищающе-перемешивающими устройствами определяется с помощью тахометра «Гермит», марки ИТ5-4. Количество расходуемой обрабатываемой среды и продолжительность наполнения ёмкости необходимо принимать такими, чтобы погрешность измерения этих параметров не превышала бы  $0,2 \div 1,0\%$ .

При проведении исследований необходимо использовать среды с ньютоновскими и неньютоновскими псевдопластичными свойствами, которыми обладают многие пищевые продукты. Желательно, чтобы в процессе исследований изменялись в широком диапазоне теплофизические характеристики как модельных сред, так и используемых пищевых продуктов, а также конструктивные формы и кинематические параметры очищающих устройств.

Обработка результатов исследований в поточном аппарате с очищаемой поверхностью при обработке сред с ньютоновскими и неньютоновскими псевдопластичными свойствами, осуществляется в следующей последовательности.

Для учёта количества тепла выделяемого в результате диссипации энергии измеряется значение энергии затрачиваемой непосредственно на перемешивание. С этой целью вначале измеряется энергия холостого хода при снятых очищающих устройствах и при отсутствии в аппарате обрабатываемой среды. Затем измеряется общая расходуемая энергия при наличии в аппарате обрабатываемой среды и установленных очищающих устройствах. Энергия затрачиваемая непосредственно на перемешивание определяется как разность замеренных энергий по формуле:

$$N = N_0 - N_{\text{хх}}, \quad (1)$$

где  $N_0$  – расходуемая энергия, Вт;  
 $N_{\text{хх}}$  – энергия холостого хода, Вт.

Полученные значения энергии, затрачиваемой непосредственно на перемешивание, используются при вычислении коэффициента теплоотдачи на стороне обрабатываемой среды.

С целью получения расчётных зависимостей для коэффициентов теплоотдачи результаты экспериментальных исследований целесообразно обрабатывать графическим методом посредством исключения переменных и осуществлять их в следующей последовательности.

При обработке опытных данных сред с ньютоновскими свойствами используя водноглицериновые растворы различной концентрации, а также пищевые продукты с неньютоновскими псевдопластичными свойствами, экспериментальные данные обрабатывать в виде зависимостей:

для сред с ньютоновскими свойствами при изотермическом течении

$$\lg\left[\frac{\text{Nu}}{\text{Pr}^{0,37}}\right] \text{ — } \lg \text{Re}, \quad (2)$$

для сред с ньютоновскими свойствами при неизотермическом течении

$$\lg\frac{\text{Nu}}{\text{Pr}^{0,37}(\mu_{\text{ст}}/\mu)^{0,14}} \text{ — } \lg \text{Re}, \quad (3)$$

для сред с неньютоновскими псевдопластичными свойствами при изотермическом течении

$$\lg\left[\frac{\text{Nu}}{\text{Pr}^{0,37}}\right] \text{ — } \lg \text{Re}_o, \quad (4)$$

для сред с неньютоновскими псевдопластичными свойствами при неизотермическом течении

$$\lg \frac{\text{Nu}}{\text{Pr}^{0,37} (\mu_{\text{ст.эф}} / \mu)^{0,14}} = \lg \text{Re}_o, \quad (5)$$

где  $\text{Nu} = \frac{\alpha l_c}{\lambda}$  - критерий Нуссельта;

$\text{Pr} = \frac{c\mu}{\lambda}$  - критерий Прандтля;

$\text{Re} = \frac{v \cdot l_c \cdot \rho}{\mu}$  - критерий Рейнольдса;

$\text{Pr}_o = \frac{c\mu_{\text{эф}}}{\lambda}$  - модифицированный критерий Прандтля;

$\text{Re} = \frac{v \cdot l_c \cdot \rho}{\mu_{\text{эф}}}$  - модифицированный критерий Рейнольдса;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на стороне обрабатываемой среды, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$l_c = \frac{\pi D}{Z}$  - расстояние между периферийными кромками пластин очищающе-перемешивающего устройства, м;

$D$  - внутренний диаметр цилиндра аппарата, м;

$Z$  - число пластин очищающе-перемешивающего устройства;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемой среды, Вт/(м·К);

$c$  – удельная теплоёмкость обрабатываемой среды, Дж/(кг·К);

$\mu$  - динамический коэффициент вязкости обрабатываемой среды с ньютоновскими свойствами, Па·с;

$\mu_{\text{эф}}$  - эффективная вязкость обрабатываемой среды с неньютоновскими псевдопластичными свойствами, Па·с;

$v = \pi D n$  – линейная скорость периферийной кромками пластины, м/с;

$n$  – частота вращения вала с очищающе-перемешивающим устройством, с<sup>-1</sup>;

$\rho$  – плотность обрабатываемой среды, кг/м<sup>3</sup>.

Показатель степени у критерия Прандтля принят согласно [20,21].

При определении эффективной вязкости неньютоновских сред и псевдопластичными свойствами, необходимо знать величину градиента скорости.

Средний градиент скорости согласно [17] вычисляется по формуле:

$$\bar{\dot{\gamma}} = 110 \cdot Z^{0,5} \cdot n, \text{ с}^{-1}; \quad (6)$$

где  $Z$  – число скребков  $n$  – частота вращения скребкового вала, с<sup>-1</sup>



При проведении исследований с неньютоновскими средами с псевдопластичными свойствами по графику вязкостно-скоростных характеристик среды определяется эффективная вязкость её при средних температурах среды, стенки аппарата и значения градиента скорости, рассчитанного по формуле (6).

Для учёта влияния на теплоотдачу ширины пластин очищающе-перемешивающих устройств, числа пластин и числа отверстий в них, в общий вид критериального уравнения теплоотдачи необходимо ввести соответствующие симплексы геометрического подобия и исследовать влияние их на теплообмен в поточном аппарате с очищаемой поверхностью теплообмена.

При проведении исследований в поточном аппарате с очищаемой поверхностью могут иметь место три режима движения: ламинарный, переходный и турбулентный. В результате обработки экспериментальных данных получают расчётные зависимости для каждого режима движения.

С целью установления степени влияния различных параметров на теплоотдачу, полученные зависимости записываются в развёрнутом виде.

### Список литературы

1. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.
2. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 384 с.
3. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем. – Л.: ЛГУ, 1981. – 172 с.
4. Измайлова В.Н., Ребиндер П.А. Структурообразование в белковых системах. – М.: Наука, 1974. – 258 с.
5. Матц С.А. Структура и консистенция пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 239 с.
6. Арет В.А., Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции. – СПб.6 ГИОРД, 2009 – 448 с.
7. Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Исследование реологических свойств смеси мороженого «Сливочное крем-брюле». Электронный научный журнал. – Процессы и аппараты пищевых производств, СПб, НИУ ИТМО ИХ и БТ, № 1, 2013г., с.166-170.
8. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. – Л.: Химия, 1975.– 484 с.
9. Федоткин И.М., Липсман В.С. Интенсификация теплообмена в аппаратах пищевых производств. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – 240 с.
10. Николаев Б.Л. Теплообмен при обработке вязких пищевых продуктов и пути его интенсификации. Межвузовский сборник научных трудов. Процессы, аппараты и машины пищевой технологии. – СПб.: СПбГАХПТ, 199. – с. 41-44.
11. Николаев Б.Л. Специфика очищающих устройств, теплообмена и расходуемой энергии в оборудовании с очищаемой поверхностью. Сборник трудов II Международной НТК. Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. СПГУНиПТ, СПб.: 2003. т.1. – с. 200-205.
12. Николаев Б.Л. Специфика тепловой обработки вязких пищевых продуктов в ёмкостном оборудовании с очищаемой поверхностью. Сборник докладов III Юбилейной Международной выставки – конференции – высокоэффективные

- технологии, методы и средства для их реализации. МГУПП, М.: 2005, - часть 1, - с. 263-265.
13. Николаев Б.Л. Научное обоснование и совершенствование ёмкостного оборудования для вязких пищевых продуктов. Вестник Международной академии холода. СПб. –М.: 2007. - №4. – с. 35-38.
  14. Николаев Б.Л. Особенности тепловых и гидродинамических процессов при обработке вязких пищевых продуктов с неньютоновскими свойствами. Материалы III Международной НТК – Низкотемпературны технологии в XXI веке. СПГУНиПТ, СПб.: 2007 т.1. – с. 607-612.
  15. Николаев Л.К., Денисенко А.Ф., Николаев Б.Л. Интенсификация процессов охлаждения маргариновых эмульсий. Электронный научный журнал – Процессы и аппараты пищевых производств, СПб, НИУ ИТМО ИХ и БТ, 2010г., №2.
  16. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Павлушенко И.С. О теплообмене в аппаратов со скребковыми мешалками. – Журнал прикладной химии. 1964, 37, №9. с. 1984-1988.
  17. Бегачёв В.И. и др. О моделировании полимезаторов со скребками. Сб. Тепло- и массообмен в неньютоновских жидкостях. – М.: Энергия, 1969, с. 279-285
  18. Николаев Л.К. Оборудование для охлаждения животных жиров. – М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1969. – 34 с.
  19. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия. 1979. – 320 с.
  20. Dinglinger G. Die Wärmeübertragung in Kratzkuhler: Kaltetechnik, 1964. –V.16 -. S. 170-175.
  21. Sukora S., Nvratil B. Heat transfer on scraped walls: Collection Czechoslovak Commun., 1966. – V. 31. - P. 3299-3308.