

УДК 621.57

## **Физическая модель поточного аппарата с очищаемой поверхностью теплообмена, методика и обработка результатов исследований, при изучении процессов расходуемой энергии на перемешивание продукта**

*Д-р техн. наук, Николаев Б.Л., Кузнецов А.В., Круподёров А.Ю.,*

*д-р техн. наук, проф. Николаев Л.К., lev.nikolaew.@yandex.ru*

*Университет ИТМО*

*Институт холода и биотехнологий*

*921002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*В статье приводится описание экспериментальной установки для исследования расходуемой энергии в поточных аппаратах с очищаемой поверхностью. Авторы приводят методику проведения исследований и вид математических зависимостей с целью получения расчетных формул в критериальном виде. При разработке экспериментальной установки были учтены особенности расходуемой энергии при обработке сред с неньютоновскими псевдопластичными свойствами. Наличие в приводе электродвигателя постоянного тока, соответствующих приборов и устройств позволяет изменять в широком диапазоне частоту вращения рабочего органа.*

*Ключевые слова:* температура, градиент скорости, реология, вязкость, расходуемая энергия.

---

## **Physical model of a flow-on of the device to the surface heat transfer, methodology and processing of results of researches on studying the processes of energy consumed on the mixing of the product**

**Nikolaev B.L., Kuznecov A.V., Krupoderov A.U.,**

**Nikolaev L.K.** lev.nikolaew.@yandex.ru

*University ITMO*

*Institute of Refrigeration and Biotechnologies*

*191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

*The article describes the experimental installation for research of the energy consumed in the production apparatus with a cleared surface. The authors present the methodology of research and views of mathematical dependencies to obtain calculation formulae in criteria-based form. During the development of the experimental setup were taken into account peculiarities of the energy consumed during processing of non-Newtonian fluids with pseudoplastic properties. The presence in the drive electric motor of a direct current, relevant instruments and devices allows you to change in a wide range of rotation frequency of the working body.*

*Key words:* temperature, velocity gradient, rheology, and viscosity, he energy expended.

---

Значительная часть пищевых продуктов обладает свойствами неньютоновской псевдопластичной жидкости [1,2,3,4,5,6,7].

Проведение исследований энергии, расходуемой на перемешивание жидкостей в поточных аппаратах с очищаемой поверхностью осуществляется на экспериментальной установке, представленной на рис.1, разработанной с учётом[8-10].

Установка состоит из модели поточного аппарата с очищаемой поверхностью 23, сборного бака 1 с лопастной мешалкой 2, потенциометра 16, автотрансформаторов 4, 16

и 21, электродвигателей постоянного тока 17 и 20, электродвигателя переменного тока 7, сосуда холодного спая 14, выпрямителей тока 19 и 22, трубчатых электронагревателей – ТЭНов 3, переключателя термодпар 15, шестерённого насоса 8, червячного редуктора 5 и муфты 6.

Аппарат 23 состоит из рабочего цилиндра 10, вала с очищающими устройствами 11 и охлаждающей рубашкой 9, имеющей снаружи слой изоляции. В стенке рабочего цилиндра вдоль всей длины его заделаны термодпары 12, размещённые равномерно по периметру.

В электрическую цепь

Термодпары 12 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 13. В электрическую цепь электродвигателя постоянного тока 17 и 20 включены ваттметры 24 и вольтметры 25. Для измерения избыточного давления на входном патрубке для модельной жидкости установлен манометр 26.

Методика проведения исследований следующая. До начала проведения исследований обрабатываемая среда нагревается в баке 1, посредством ТЭНов 3, до требуемой температуры. Поддержание температуры жидкости в заданных пределах обеспечивается посредством изменения напряжения, подаваемого на один из ТЭНов 3, через автотрансформатор 4. Остальные ТЭНы включаются в нужном количестве в зависимости от интенсивности теплообмена в аппарате 23. Для обеспечения равномерной температуры обрабатываемой среды в баке 1 по всему объёму его, жидкость постоянно перемешивается мешалкой 2, привод которой размещён на крышке бака.

Модельную жидкость заданной температуры шестерённым насосом 8 из бака 1 подают в рабочую полость аппарата 23, образованную внутренней поверхностью рабочего цилиндра и наружной поверхностью вала с очищающими устройствами. При протекании обрабатываемой среды в рабочей полости аппарата 23 осуществляется перемешивание её очищающими устройствами, размещёнными на валу 11. Из аппарата обрабатываемая среда по трубопроводу возвращается в бак 1. Рабочая жидкость, пройдя через рубашку аппарата, направляется в сливную трубу.

Температура обрабатываемой среды на входе и выходе из аппарата, а также разность температур её измеряются термодпарами. 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 термодпар.

Показания термодпар фиксируют потенциометром 16. Материал термодпар медь-константан. Привод вала с очищающе-перемешивающими устройствами и привод шестерённого насоса 8 осуществляется от автономных электродвигателей постоянного тока 17 и 20, что даёт возможность изменять, как частоту вращения вала, так и производительность насоса в широком диапазоне.

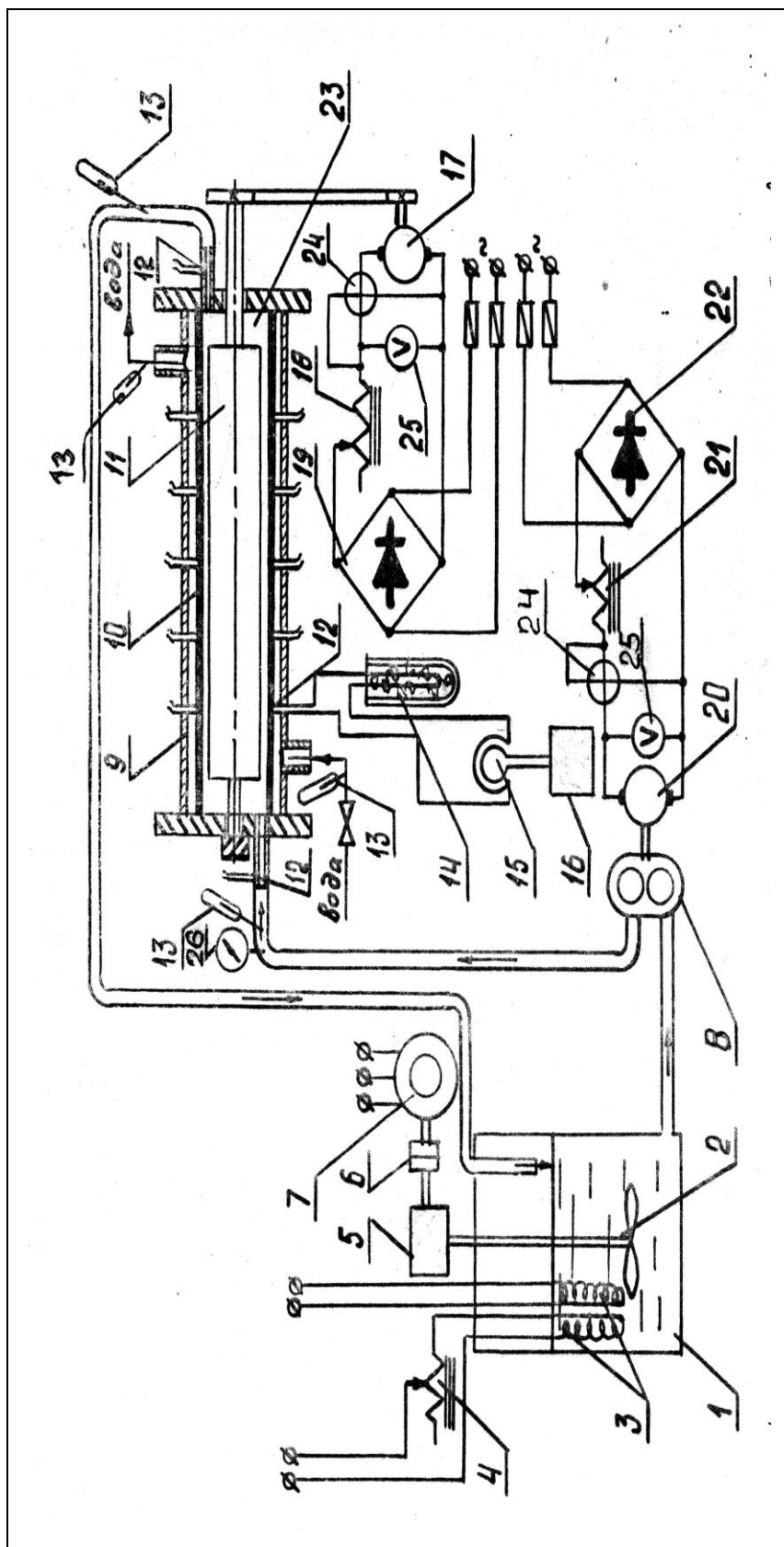


Рис.1 Схема экспериментальной установки: 1 – бак; 2 – мешалка; 3- ТЭНы; 4,8,21 – автотрансформаторы; 5 – редуктор; 6 – муфта; 7 – электродвигатель переменного тока; 8 – насос; 9 – охлаждающая рубашка; 10 – рабочий цилиндр; 11 – вал; 12 – термометры; 13 – термометры; 14 – сосуд для холодного сляя; 15 – переключатель терморпар; 16 – потенциометр; 17,20 – электродвигатели постоянного тока; 19,22 – выпрямители тока; 23 – теплообменный аппарат; 24 – ваттметры; 25 – вольтметры; 26 – манометр.

В патрубках для хладоносителя установлены термометры 13.

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 желательнее использовать вязкие пищевые среды с неньютоновскими псевдопластичными свойствами.

Конструкция вала позволяет устанавливать на нём скребковое устройство с различным числом рядов очищающих устройств на валу, а также размещать на валу пластины очищающих устройств с различным числом отверстий в них. Энергию, расходуемую 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 17 подсоединён ваттметр 24, а для контроля напряжения в обмотках электродвигателя в электрическую цепь включён вольтметр 25. Производительность шестеренного насоса 8 изменяется посредством другого электродвигателя постоянного тока 20. 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 «Термит», марки ИТ5-4. Количество расходуемой обрабатываемой среды и продолжительность наполнения ёмкости необходимо принимать такими, чтобы погрешность измерения этих параметров не превышала бы  $0,2 \div 1,0\%$ .

Обработка результатов исследований гидродинамических процессов 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  $N_0$  – общая энергия, Вт;  
 $N_{\text{хх}}$  – энергия холостого хода, Вт.

Полученные значения энергии, затрачиваемой непосредственно на перемешивание, используются при вычислении модифицированного критерия мощности, определяемого по уравнению:

$$K_N = \frac{N}{\rho \cdot n^3 \cdot d_0^4 \cdot L}, \quad (2)$$

где  $N$  – энергия расходуемая на перемешивание, Вт;  
 $\rho$  – плотность обрабатываемой среды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $n$  – частота вращения очищающего устройства, с<sup>-1</sup>;  
 $d_0$  – диаметр очищающего устройства, равный внутреннему диаметру рабочего цилиндра аппарата, м;  
 $L$  – длина очищающего устройства, м.

Уравнение (2) отражает конструктивную специфику очищающего устройства поточного аппарата, в котором длина лопасти во много раз больше диаметра очищающего устройства. С учётом отмеченного в критерий мощности диаметр очищающего устройства входит не в пятой, а в четвёртой степени, но одновременно вводится длина перемешивающего устройства.

Значения критериев Рейнольдса центробежного и Рейнольдса центробежного обобщённого вычисляются отдельно для сред с ньютоновскими и сред с неньютоновскими псевдопластичными свойствами. С учётом отмеченного для сред с ньютоновскими свойствами модифицированный центробежный критерий Рейнольдса рассчитывается по формуле:

$$Re_{ц} = \frac{\rho \cdot n \cdot d_0^2}{\mu}, \quad (3)$$

а для сред с неньютоновскими псевдопластичными свойствами модифицированный критерий Рейнольдса центробежный обобщённый определяется по формуле:

$$Re_{ц,о} = \frac{\rho \cdot n \cdot d_0^2}{\mu_{эф}}, \quad (4)$$

где  $Re_{ц}$  – модифицированный критерий Рейнольдса центробежный при обработке сред с ньютоновскими свойствами;

$Re_{ц,о}$  – модифицированный критерий Рейнольдса центробежный обобщённый при обработке неньютоновских сред с псевдопластичными свойствами;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости обрабатываемой среды при средней температуре в аппарате, Па·с;

$\mu_{эф}$  – эффективная вязкость обрабатываемой среды с неньютоновскими псевдопластичными свойствами при средней температуре обрабатываемой среды в аппарате, Па·с.

В критериальные уравнения для определения модифицированной мощности помимо модифицированных критериев Рейнольдса необходимо ввести: симплексы геометрического подобия, учитывающие влияние ширины очищающих пластин и влияние отверстий в пластинах очищающих устройств на расходуемую энергию, а также безразмерное выражение, отражающее зависимость расходуемой энергии от числа очищающих пластин.

С учётом изложенного общий вид уравнений модифицированных центробежных критериев мощности будет иметь вид:

для сред с ньютоновскими свойствами

$$K_N = A \cdot Re_{ц}^m \cdot \Gamma^n \cdot S^p \cdot j^c, \quad (5)$$

для сред с неньютоновскими псевдопластичными свойствами

$$K_{N.O} = B \cdot Re_{ц.O}^e \cdot \Gamma^n \cdot S^p \cdot j^c, \quad (6)$$

где, помимо известных:

$K_N$  – модифицированный центробежный критерий мощности;

$K_{N.O}$  – модифицированный центробежный обобщённый критерий мощности;

$\Gamma = \frac{b}{d_0}$  – симплекс геометрического подобия;

$b$  – ширина очищающей пластины, м;

$S = \frac{S}{S_{баз}}$  – безразмерное выражение, отражающее зависимость расходуемой энергии от числа очищающих пластин;

$S$  – число очищающих пластин;

$S_{баз}$  – базовое число очищающих пластин;

$j^c = \frac{j}{j_{баз}}$  – безразмерное выражение, отражающее зависимость расходуемой энергии от числа отверстий в пластине;

$j$  – число отверстий в пластине;

$j_{баз}$  – базовое число отверстий в пластине;

$A, B$  – коэффициенты уравнения;

$m, n, p, e, c$  – показатели степени.

Последовательность проведения исследований по определению расходуемой энергии в поточном аппарате с очищаемой поверхностью с целью получения расчётных зависимостей следующая: устанавливается режим движения обрабатываемой среды в аппарате – ламинарный, переходной или турбулентный.

Предварительно рассчитывается значение модифицированного критерия Рейнольдса по формуле (3) для сред с ньютоновскими свойствами или по формуле (4)

для неньютоновских сред с псевдопластичными свойствами и опытные данные обрабатываются в виде следующих зависимостей:

для сред с ньютоновскими свойствами при изотермическом течении

$$\lg K_N \text{ — } \lg Re_{ц}, \quad (7)$$

или в развёрнутом виде

$$\lg(N/\rho \cdot n^3 d_0^4 \mathcal{L}) \text{ — } \lg(\rho \cdot n d_0^2/\mu), \quad (8)$$

для сред с ньютоновскими свойствами при неизотермическом течении

$$\lg \frac{K_N}{(\mu_{ст}/\mu)^{0,14}} \text{ — } \lg(\rho \cdot n d_0^2/\mu), \quad (9)$$

или в развёрнутом виде

$$\lg \frac{N/\rho \cdot n^3 d_0^4 \mathcal{L}}{(\mu_{ст}/\mu)^{0,14}} \text{ — } \lg(\rho \cdot n d_0^2/\mu), \quad (10)$$

для сред с неньютоновскими псевдопластичными свойствами при изотермическом течении

$$\lg K_{N.O} \text{ — } \lg Re_{ц.о}, \quad (11)$$

или в развёрнутом виде

$$\lg(N/\rho \cdot n^3 d_0^4 \mathcal{L}) \text{ — } \lg(\rho \cdot n d_0^2/\mu_{эф}), \quad (12)$$

для сред с нененьютоновскими псевдопластичными свойствами при неизотермическом течении

$$\lg \frac{K_{N.O}}{(\mu_{эф.ст}/\mu_{эф})^{0,14}} \text{ — } \lg Re_{ц.о}, \quad (13)$$

или в развёрнутом виде

$$\lg \frac{N/\rho \cdot n^3 d_0^4 \mathcal{L}}{(\mu_{эф.ст}/\mu_{эф})^{0,14}} \text{ — } \lg(\rho \cdot n d_0^2/\mu_{эф}), \quad (14)$$

где помимо ранее известных:

$\mu_{эф.ст}$  – вязкость обрабатываемой среды с нененьютоновскими псевдопластичными свойствами при температуре стенки, Па·с.

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

С целью установления степени влияния различных параметров на расходуемую энергию полученные зависимости записываются в развёрнутом виде.

### Список литературы

1. Арет В.А., Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции. – СПб.б. ГИОРД, 2009 – 448 с.
2. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов. – М: Пищевая промышленность, 1979. – 384с.
3. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.
4. 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
5. Николаев Л.К., Николаев Б.Л. Изменение вязкостно – скоростных характеристик плавленого сыра «Янтарь» от температуры продукта и скорости деформации. Электронный научный журнал. – Процессы и аппараты пищевых производств, СПб, НИУ ИТМО ИХ и БТ, № 1, 2013г., с.171-174.
6. Библик Е.Е. Реология дисперсных систем. – Л.: ЛГУ, 1981. -172с.
7. Измайлова В.Н., Ребиндер П.А. Структурообразование в белковых системах. – М.: Наука. 1974. – 248с.
8. Николаев Б.Л. Теплообмен при обработке вязких пищевых продуктов и пути его интенсификации. Межвуз. сб. науч тр. "Процессы, аппараты и машины пищевой технологии." – СПб.: СПбГАХИТ, 1988. с. 41-44.
9. Николаев Б.Л. Специфика очищающих устройств, теплообмена и расходуемой энергии в оборудовании с очищаемой поверхностью. Сборник трудов II Междун. НТК. «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003. Т.1. – с. 200-205.
10. Николаев Б.Л. Особенности тепловых и гидродинамических процессов при обработке вязких пищевых продуктов с неньютоновскими свойствами. Материалы III Междун. НТК. «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». – СПб.: СПбГУНиПТ, 2007. Т.1. – с. 607-612.