

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.

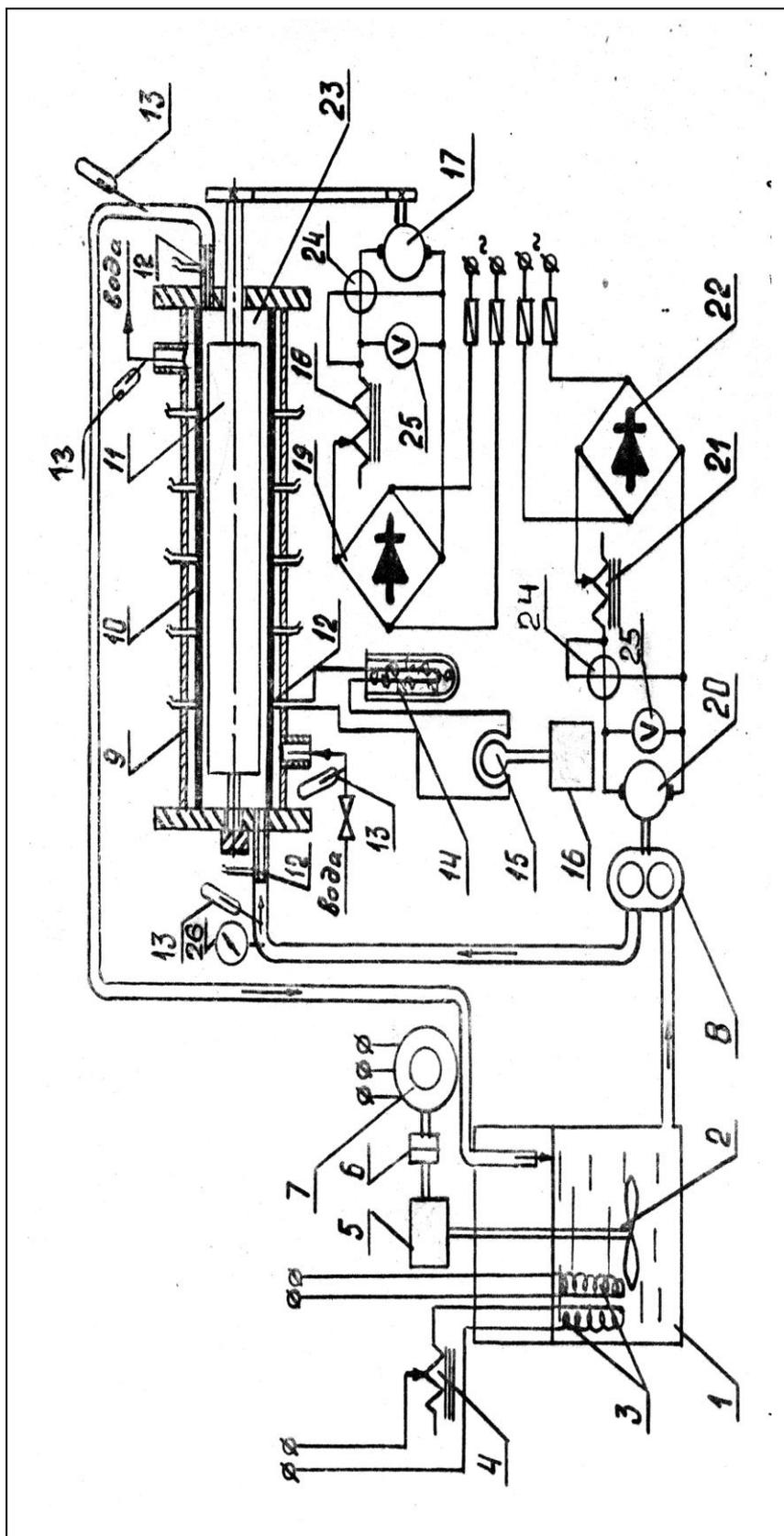


Рис.1 Схема экспериментальной установки: 1 – бак; 2 – мешалка; 3- ТЭНы; 4,8,21 – автотрансформаторы; 5 – редуктор; 6 – муфта; 7 – электродвигатель переменного тока; 8 – насос; 9 – охлаждающая рубашка; 10 – рабочий цилиндр; 11 – вал; 12 – термометры; 13 – термометры; 14 – сосуд для холодного спая; 15 – переключатель термометр; 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;

ρ – плотность обрабатываемой среды, кг/м³;

n – частота вращения очищающего устройства, с⁻¹;

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;

μ – 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

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

для сред с неньютоновскими псевдопластичными свойствами

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

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;

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

S – число очищающих пластин;

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

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

j – число отверстий в пластине;

$j_{\text{баз}}$ – 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.6 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.