

УДК 621.57

## **Исследование критерия мощности при обработке вязких пищевых продуктов и других сред с псевдопластичными свойствами в ёмкостном оборудовании с очищающими перемешивающими устройствами**

*Д-р техн. наук* **Николаев Б.Л.**,

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

*Университет ИТМО*

*191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*В статье приводятся результаты исследований критерия мощности в ёмкостном оборудовании с очищающими перемешивающими устройствами при обработке вязких сред с ньютоновскими свойствами – растворов глицерина, и вязких сред с неньютоновскими псевдопластинчатыми свойствами – карбоксилметилцеллюлозы, сметаны с содержанием жира 15%, кетчупа «Сладкий», майонеза «Колибри» и ряженки с содержанием жира 4%. Установлено предельное значение критерия Рейнольдса центробежного для ламинарного течения сред с ньютоновскими свойствами равное 740 и для сред с неньютоновскими псевдопластинчатыми свойствами равное 2400.*

*Ключевые слова:* критерий мощности, псевдопластинчатые свойства, тепловая обработка, теплопроводность, модельная среда, температура.

---

## **Research capacity in the processing of viscous food products and other environments with pseudo-plastic properties of capacitive equipment cleaning mixing devices**

*D.Sc.* **Nikolaev B.L.**, *D.Sc., prof.* **Nikolaev L.K.**, lev.nikolaew.@yandex.ru

*University ITMO*

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

*In article results of researches of the criterion of power in capacitive equipment cleaning mixing devices in the processing of viscous fluids with the Newtonian properties of solutions of glycerol. And viscous mediums with non-Newtonian pseudoplasticity properties - karboksimetiltsellulozy, sour cream with fat content of 15%, ketchup "Sweet", mayonnaise "Kolibri" and boiled fermented milk with fat content of 4%. Set limit value of the Reynolds criterion for centrifugal laminar media with Newtonian properties equal 740 and for environments with non-Newtonian pseudoplasticity properties 2400.*

**Key words:** the criterion of power, pseudoplasticity properties, thermal treatment, the thermal conductivity, model environment temperature.

Экспериментальные исследования по расходу потребляемой мощности в ёмкостном оборудовании с очищающим перемешивающим устройством первоначально проводились с использованием в качестве модельной среды раствора карбоксиметилцеллюлозы. Раствор карбоксиметилцеллюлозы обладает свойствами псевдопластичной неньютоновской среды. Эти свойства характерны для многих вязких пищевых продуктов[1-4].

При разработке оборудования для вязких пищевых продуктов необходимо учитывать специфику обработки их [5-8].

В процессе проведения исследований значения критерия Рейнольдса центробежного обобщённого изменялись от 210 до 8779. При этом критерий мощности изменялся от 0,53 до 7,14.

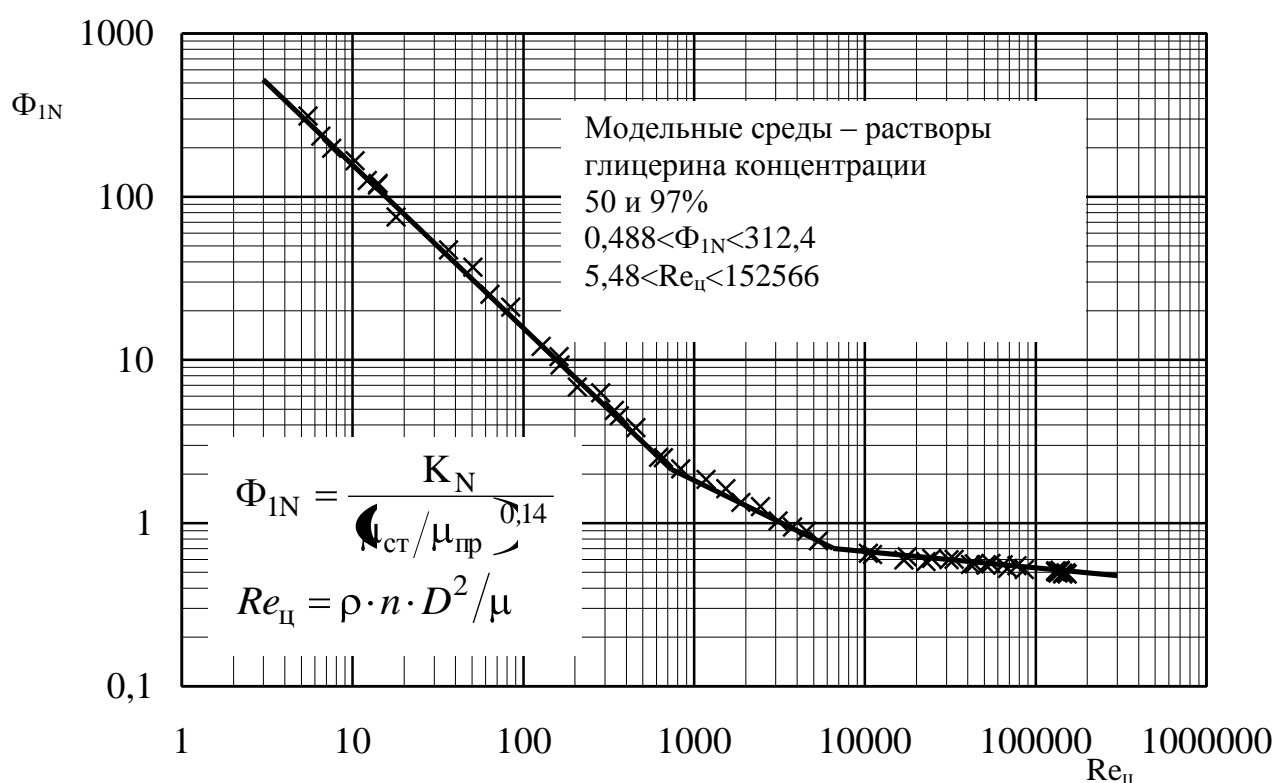


Рис. 1. Результаты исследований зависимости критерия мощности от критерия Рейнольдса центробежного в модели ёмкостного оборудования с двухлопастным очищающим перемешивающим устройством при неизотермическом движении сред с ньютоновскими свойствами – растворов глицерина.

Графическая обработка экспериментальных данных была осуществлена в логарифмических координатах  $\Phi_{1N} - Re_{ц.о.}$  (рис.1), где:

$$\Phi_{1N} = \frac{N}{\rho \cdot n^3 \cdot D^4 \cdot L \cdot \left( \frac{\mu_{эф. ст.}}{\mu_{эф}} \right)^{0,14}} - \text{функциональная зависимость расходуемой}$$

энергии в ёмкостном оборудовании с очищающим перемешивающим устройством при неизотермическом течении среды с ньютоновскими свойствами:

$$Re_{ц} = \frac{\rho \cdot n \cdot D^2}{\mu} - \text{критерий Рейнольдса центробежный};$$

$$Re_{ц.о.} = \frac{\rho \cdot n \cdot D^2}{\mu_{эф}} - \text{критерий Рейнольдса центробежный обобщённый};$$

$\mu_{эф}$  – эффективная вязкость неньютоновской среды, Па·с;

$\mu$  – динамическая вязкость ньютоновской среды, Па·с;

$\mu_{эф ст.}$  – эффективная вязкость при температуре стенки. Па·с;

$\mu_{ст.}$  – динамическая вязкость при температуре стенки. Па·с.

На рис.1 приведена кривая для сред с ньютоновскими свойствами в интервале критерия Рейнольдса центробежного от 5,48 до 152566, а на рис.2 сплошная кривая для неньютоновской среды с псевдопластичными свойствами - раствора карбоксилметилцеллюлозы – при изменении критерия Рейнольдса центробежного обобщённого от 210,5 до 8779 и пунктирная линия для ньютоновских сред.

Установлено, что области ламинарного режима движения существенно отличаются для сред с ньютоновскими и неньютоновскими псевдопластичными свойствами. При этом, если ламинарное движение для сред с ньютоновскими свойствами имеет место при значениях критерия Рейнольдса центробежного менее 740, то для неньютоновских сред с псевдопластичными свойствами ламинарное движение распространяется до значений критерия Рейнольдса центробежного, равного 2400.

Увеличение области ламинарного движения для неньютоновских сред с псевдопластичными свойствами объясняется тем, что ассиметричные молекулы таких сред подвергаются более полному упорядочению. При этом они размещаются по более длинной оси в направлении течения потока среды. В результате этого уменьшается напряжение сдвига, а тем самым и эффективная вязкость среды становится меньше, что обуславливает уменьшение расходуемой энергии,

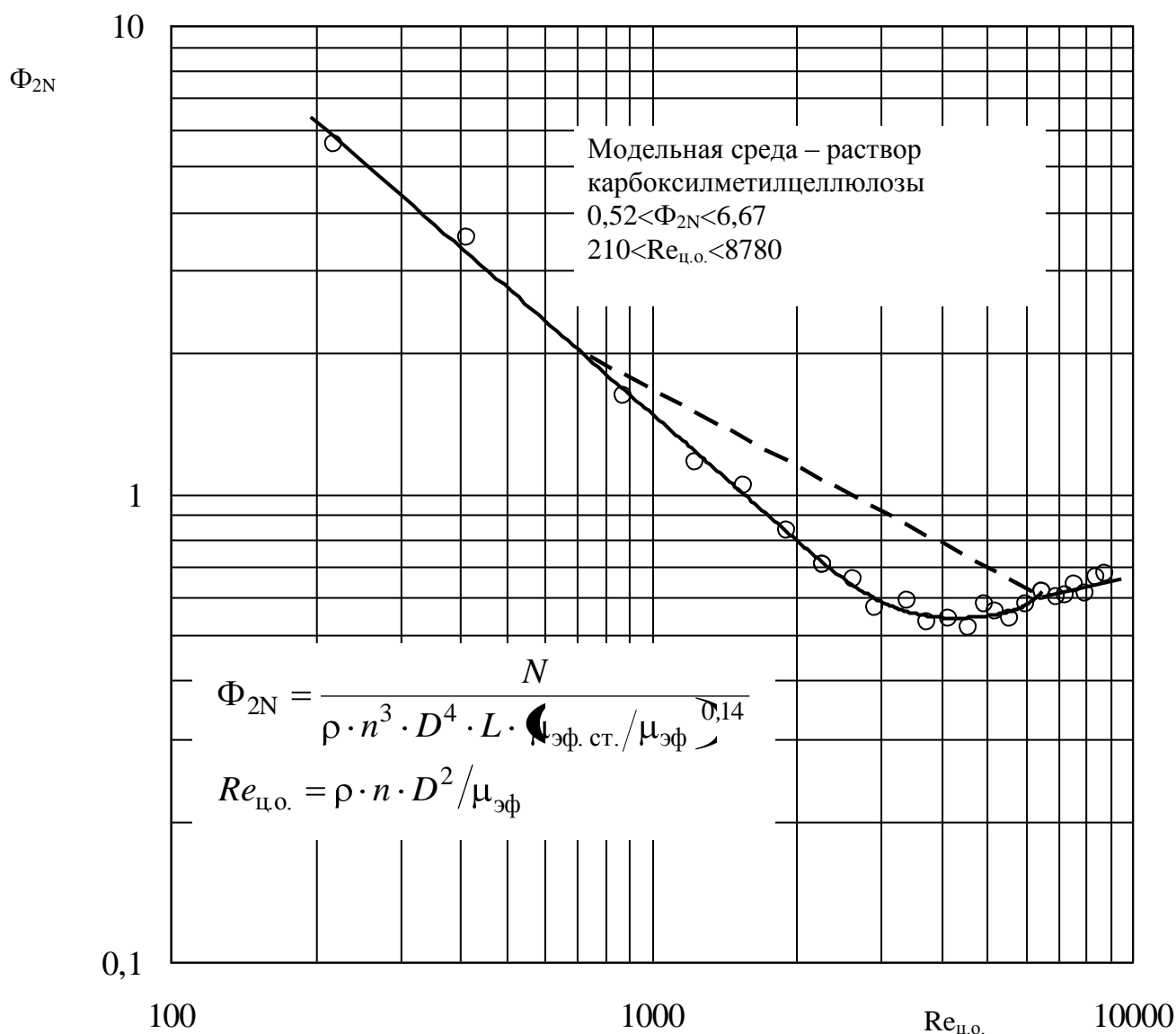


Рис. 2. Результаты исследований зависимости критерия мощности от критерия Рейнольдса центробежного обобщённого в модели ёмкостного оборудования с двухлопастным очищающим перемешивающим устройством при неизотермическом движении среды: сплошная линия – для неньютоновской среды с псевдопластичными свойствами – раствора карбоксиметилцеллюлозы; пунктирная линия – для ньютоновских сред.

Сказанное подтверждается расположением кривых на рис.2 для ньютоновских сред и неньютоновских сред с псевдопластичными свойствами. По расположению пунктирной и сплошной кривых видно различие в потребляемой мощности при перемешивании сред с ньютоновскими и псевдопластичными свойствами. Это имеет важное значение для практики при определении расходуемой энергии на перемешивание вязких пищевых продуктов[9–11].

На втором этапе проведения экспериментов, исследования проводились со сметаной, содержащей 15% жира, майонезом "Колибри", кетчупом "Сладкий" и ряженкой с содержанием жира 4%.

Исследования по определению зависимости критерия мощности от критерия Рейнольдса центробежного обобщённого при неизотермическом движении продукта с неньютоновскими псевдопластичными свойствами – сметаны с содержанием жира 15% осуществляли при охлаждении и нагревании сметаны.

В процессе исследований изменяли значения критерия Рейнольдса центробежного обобщённого от 79,8 до 18605.

При этом критерий мощности изменялся от 0,56 до 19,4, а значение функциональной зависимости расходуемой энергии  $\Phi_{2N}$  – от 0,55 до 19,0.

Сравнительно большой интервал изменений критерия Рейнольдса центробежного обобщённого позволил установить области трёх режимов движения – ламинарного, переходного и турбулентного. При этом ламинарное течение имело место при значениях критерия Рейнольдса центробежного обобщённого от 79,8 до 2400 с показателем степени у  $Re_{ц.о.}$  равным минус единице. Области ламинарного течения для сметаны и раствора карбоксилметилцеллюлозы совпадают. Это можно объяснить тем, что обе среды обладают неньютоновскими псевдопластичными свойствами.

Переходный режим движения при обработке сметаны наблюдался в интервале критерия Рейнольдса центробежного обобщённого от 2400 до 9000.

Когда значения Рейнольдса центробежного обобщённого свыше 9000, то имеет место турбулентный характер движения. При этом с увеличением критерия продолжается процесс упорядочения ассиметричных молекул, и угол наклона кривой расходуемой энергии становится незначительным.

Проведение исследований майонеза «Колибри» осуществляли как при нагревании, так и при его охлаждении.

Температуру продукта в процессе исследований изменяли от 15,5 до 47,8°C. В этом интервале температур значения эффективной вязкости майонеза наиболее значимы, так как оказывают существенно влияние на гидродинамические и тепловые процессы при производстве этого продукта.

В связи с тем, что майонез обладает свойствами псевдопластичной среды, его эффективная вязкость зависит не только от температуры продукта, а также от градиента скорости. На величину градиента скорости оказывают влияние частота вращения перемешивающего устройства, его конструкция и геометрические размеры.

Среди перечисленных параметров наиболее существенным является частота вращения перемешивающего устройства, которая при проведении исследований

изменялась от 0,53 до 10,42 с<sup>-1</sup>.

С учётом температурных и кинематических параметров эффективная вязкость майонеза "Колибри" при проведении исследований изменялась от 0,098 до 0,760 Па·с. В процессе исследований изменялись критерий Рейнольдса центробежный обобщённый – от 10,04 до 1512, и критерий мощности – от 1,26 до 128, а также функциональная зависимость расходуемой энергии – от 1,27 до 150.

Экспериментальные исследования по определению расходуемой мощности при обработке кетчупа "Сладкий" проводили при неизотермическом движении продукта в процессе его нагревания и охлаждения в интервале температур от 17 до 52,4 °С. Частота вращения перемешивающего устройства изменялась от 0,35 до 15,7 оборотов в секунду. В процессе проведения исследований эффективная вязкость кетчупа "Сладкий" изменялась от 0,135 до 0,905 Па·с. Минимальное значение критерия Рейнольдса центробежного обобщённого было 6,4, а максимальное - 1903. Критерий мощности изменялся от 0,93 до 227.

В процессе проведения исследований по определению зависимости критерия мощности от критерия Рейнольдса центробежного обобщённого при неизотермическом движении ряженки с содержанием жира 4% продукт нагревался и охлаждался от 18,4 до 37,3 °С. Частота вращения перемешивающего устройства изменялась от 0,783 до 11,83 оборотов в секунду. Эффективная вязкость ряженки с учётом её зависимости от градиента скорости и температуры продукта изменялась от 0,024 до 0,140 Па·с.

Минимальное значение критерия Рейнольдса центробежного обобщённого равнялось 90,68, а максимальное - 6380. Критерий мощности изменялся от 0,57 до 18,3.

Как и при исследованиях с другими продуктами, обладающими свойствами неньютоновской псевдопластичной среды, при обработке ряженки в ёмкостном аппарате с очищающим перемешивающим устройством область ламинарного течения ограничивалась значением критерия Рейнольдса центробежного обобщённого, равным 2400.

Для опытных данных: сметаны с содержанием жира 15%, майонеза "Колибри", кетчупа "Сладкий" и ряженкой с содержанием жира 4% справедлива кривая в виде сплошной линии (рис.2), как для раствора карбоксилметилцеллюлозы, обладающего свойствами неньютоновской псевдопластичной среды.

Установлены зоны ламинарного течения для сред с ньютоновскими псевдопластичными свойствами. Выявлено, что для пищевых продуктов с неньютоновскими псевдопластичными свойствами область ламинарного течения их значительно больше, чем при перемешивании в ёмкостном оборудовании вязких сред с ньютоновскими свойствами, перемешивающими устройствами такого же типа.

При этом, если предельное значение критерия Рейнольдса центробежного для ламинарного движения сред с ньютоновскими свойствами равно 740, то предельное

значение критерия Рейнольдса центробежного обобщённого для ламинарного движения сред с неньютоновскими псевдопластичными свойствами значительно больше и равно 2400. объясняется это тем, что ассиметричные молекулы вязких пищевых продуктов с псевдопластичными свойствами размещаются по длинной оси в направлении течения потока продукта. при этом вязкость продукта становится меньше, в результате этого уменьшается потребляемая мощность на перемешивание продукта, что необходимо учитывать при определении расходуемой энергии.

### Список литературы

1. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. – Л.: Химия, 1975г. – 384с.
2. Штербачек З., Тасук П. Перемешивание в химической промышленности. – Госхимиздат. 1963г. – 416с.
3. Арет В.А., Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции. – СПб.6 ГИОРД, 2009 – 448 с.
4. Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Тепловые процессы и оборудование для тепловой обработки жиросодержащих молочных продуктов. – СПб., ГИОРД, 2014г. – 296с.
5. Николаев Л.К., Николаев Б.Л. Инновационные возможности при разработке оборудования для обработки вязких пищевых продуктов. Материалы Международной НТК «Адаптация технологических производств к пищевым машинными технологиями». – Воронеж. 2012г.
6. Николаев Б.Л., Круподёров А.В., Николаев Л.К., Денисенко А.Ф. Критерии, симплексы подобия и критерериальные уравнения при моделировании процессов перемешивания вязких и аномально вязких продуктов поточных аппаратов с очищаемой поверхностью теплообмена. Материалы X Международной НТК «Инновации в науке и образовании». – Калининград, 2012г
7. Николаев Б.Л., Круподёров А.В., Николаев Л.К. Специфика тепловых процессов при обработке продуктов с псевдопластичными свойствами. Материалы X Международной НТК «Инновации в науке и образовании». – Калининград, 2012г.
8. Николаев Б.Л., Арет В.А., Николаев Л.К. Теоретическое определение закономерностей распределения давления на лопасть лопастных мешалок в ёмкостном оборудовании // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». № 1. 2012г.
9. Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Расчётная зависимость для определения градиента скорости в ёмкостном оборудовании с очищающими перемешивающими

устройствами. Сборник докладов Международной НТК «Энергосберегающие процессы и аппараты в пищевых и химических производствах». – Воронеж, 2011 г.

10. Николаев Б.Л., Денисенко А.Ф., Николаев Л.К. Исследование влияния ширины очищающе-перемешивающих устройств в поточных аппаратах с очищаемой поверхностью теплообмена. // Вестник Международной академии холода. 2010.

11. Николаев Л.К., Денисенко А.Ф., Николаев Б.Л. Интенсификация процессов охлаждения маргариновых эмульсий // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». № 2. 2010 г.

### References

1. Strenk F. Hashing and devices with mixers. – L.: Khimiya, 1975. – 384 p.

2. Shterbachek Z., Tasuk P. Hashing in the chemical industry. – Goskhimizdat. 1963. 416 p.

3. Aret V.A., Nikolaev B.L., Nikolaev L.K. Physicomechanical properties of raw materials and finished goods. – SPb.6 GIORД, 2009. 448 p.

4. Nikolaev B.L., Nikolaev L.K. Thermal processes and equipment for thermal treatment of fat-containing dairy products. – SPb., GIORД, 2014. – 296p.

5. Nikolaev L.K., Nikolaev B.L. Innovative opportunities when developing the equipment for processing of viscous foodstuff. Materials of the International NTK "Adaptation of Technological Productions to Food Machine Technologies". – Voronezh, 2012.

6. Nikolaev B.L., Krupoderov A.V., Nikolaev L.K., Denisenko A.F. Criteria, симплексы similarity and the kriterierialny equations when modeling processes of hashing of viscous and abnormally viscous products of line devices with a cleared surface of heat exchange. Materials X of the International NTK "Innovations in Science and Education". – Kaliningrad. 2012.

7. Nikolaev B.L., Krupoderov A.V., Nikolaev L.K. Specifics of thermal processes when processing products with pseudo-plastic properties. Materials X of the International NTK "Innovations in Science and Education". – Kaliningrad. 2012.

8. Nikolaev B.L., Aret V.A., Nikolaev L.K. Theoretical determination of regularities of distribution of pressure upon the blade of bladed mixers in the capacitor equipment. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. № 1. 2012.

9. Nikolaev B.L., Nikolaev L.K. Settlement dependence for definition of a gradient of speed in the capacitor equipment with clearing mixing devices. Collection of reports of the International NTK "Energy Saving Processes and Devices in Food and Chemical Productions". – Voronezh, 2011.



10. Nikolaev B.L., Denisenko A.F., Nikolaev L.K. Research of influence of width of ochishchayushche-mixing devices in line devices with a cleared surface of heat exchange. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2010.

11. Nikolaev L.K., Denisenko A.F., Nikolaev B.L. Intensification of processes of cooling of margarine emulsions. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. № 2. 2010.