

УДК 637.1.02:621.642

Теплоотдача в оборудовании с очищаемой поверхностью теплообмена при обработке вязких сред с неньютоновскими свойствами

А.Ю. Круподёров, a.lex.k@mail.ru

Д-р техн. наук Л.К. Николаев, lev.nikolaew@yandex.ru

Университет ИТМО

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

Использование теплообменных аппаратов с очищаемой поверхностью наиболее целесообразно при осуществлении производственных процессов, связанных с тепловой обработкой вязких сред. Значительное количество вязких сред, в том числе большинство вязких пищевых продуктов, обладают неньютоновскими свойствами. Основным преимуществом подобных аппаратов является турбулизация пристенного слоя продукта, что особенно важно при осуществлении производственных процессов, связанных с охлаждением, так как вязкость некоторых сред может возрасти в десятки раз. Кроме того, структурно-механические свойства сред обладающих аномальной вязкостью могут существенно изменяться в процессе механической обработки. В статье рассмотрены исследования ряда авторов в области теплообменного оборудования с очищаемой поверхностью при обработке аномально вязких сред. Описано влияние конструктивных особенностей исследованного оборудования на эффективность теплопередачи. Рассмотрены основные факторы способные затруднять теплообмен.

Ключевые слова: емкость; теплообменник; перемешивающие устройства; пищевые продукты; вязкость; термическое сопротивление; теплообмен.

Heat transfer in the Scraped Surface Heat Exchangers in the processing of viscous fluids with non-Newtonian properties

A.Y. Krupoderov, a.lex.k@mail.ru

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

ITMO University

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

The use of heat exchangers with a scraped surface is most advisable in the implementation of production processes associated with the heat treatment of viscous fluids. Considerable amounts of viscous fluids, including the majority of viscous food products, have non-Newtonian characteristics. The main advantage of such apparatus is the turbulence in the boundary layer of the product, which is especially important in the production processes associated with cooling, so the viscosity of some fluids increases by dozens of times. In addition, the structural and mechanical properties of the fluid with anomalous viscosity can change significantly during mechanical treatment. The article deals with the studies of a number of authors in the field of heat transfer equipment with a scraped surface in the processing of abnormally viscous fluids. This article describes the impact of the equipment design features on the efficiency of heat transfer. The article discusses the factors that are able to impede heat transfer.

Keywords: vessel; heat exchanger; stirring devices; food products; viscosity; thermal resistance; heat transfer.

Весьма перспективным при тепловой обработке вязких продуктов является использование поточных аппаратов с очищающими устройствами. Такие устройства обеспечивают механическую и гидродинамическую турбулизацию пристенных слоев обрабатываемых продуктов, оказывающих существенное термическое сопротивление при осуществлении тепловых процессов.

Большинство вязких сред, используемых в пищевых производствах и значительное количество вязких сред непищевой промышленности, обладают аномально-вязкими неньютоновскими свойствами [1, 2].

Установление закономерностей при тепловой обработке пищевых продуктов с неньютоновскими свойствами в оборудовании с очищаемой поверхностью может быть использовано для интенсификации тепловых

процессов в этих аппаратах. Таким образом, установление закономерностей теплообмена в аппаратах с очищающими устройствами с учетом прогрессивных способов интенсификации тепловых процессов при обработке вязких пищевых продуктов, которые обладают свойствами неньютоновской псевдопластичной среды, представляет научный и практический интерес. Наиболее важным вопросом при исследовании теплообмена в аппаратах с очищающими устройствами является влияние счищаемого застывшего слоя на коэффициент теплоотдачи на стороне продукта. Другим фактором, затрудняющим теплообмен, может являться масляная пленка на поверхности трубопроводов. Кроме того, необходимо учитывать толщину и материал теплопередающей стенки рабочего цилиндра теплообменника [3].

Вопросом определения теоретической зависимости тепловых процессов в оборудовании с очищающими перемешивающими устройствами занимались такие исследователи как: Л.Н. Брагинский, И.А. Конвисер, М.Д. Глуз, А.Н. Р. Skelland, J. Kool, G.A. Latinen и другие. В своих работах они выражали тепловые зависимости в виде критериальных уравнений.

Мабит и соавторы [4] исследовали скребковый теплообменник, являющийся аналогом аппаратов, используемых в пищевой промышленности. Аппарат имел два скребковых устройства.

Диаметр скребкового вала составлял 0,08 м. Внутренний диаметр теплообменного цилиндра равнялся 0,12 м. Площадь теплообменной поверхности составляла 0,245 м². В качестве обрабатываемой среды использовался раствор карбоксиметилцеллюлозы обладающий неньютоновскими свойствами. Частота вращения скребковой мешалки изменялась в диапазоне 5–1230 с⁻¹. Ключевой особенностью исследования [4], является зафиксированный факт существенного влияния вихревых потоков, образующихся в аппарате, на теплообмен. Дополнительная турбулизация потока интенсифицировала теплопередачу наряду с очищающим действием скребковых устройств.

Пэрес Мартитез [5] и другие проводили исследование кристаллизации смеси какао-масла и растительного масла в скребковом аппарате. Использованный аппарат представлял собой двухцилиндровый теплообменник с очищаемой поверхностью. Теплопередающая поверхность каждого цилиндра составляла 0,045 м. Скорость вращения мешалки изменялась от 1,7 до 17 с⁻¹. В аппарат подавался продукт температурой 80°C. Авторами было установлено, что процесс теплообмена и качество итогового продукта сильно зависят не только от параметров аппарата, но и от состава жидкой фазы кристаллизующейся смеси. Триэтиленгликоль, содержащийся в жировой фазе, замедляет кристаллизацию и таким образом приводит к более интенсивному теплообмену при температурах кристаллизации.

Франсин Фейол и соавторы [6] проводили исследования структуры потока при производстве мороженого в скребковом фризере. Внутренний диаметр рабочего цилиндра экспериментального фризера равнялся 0,065 м. Диаметр вытеснительного барабана равнялся 0,04 м. Длина рабочего цилиндра 0,38 м. Частота вращения скребковой мешалки фризера составляла 500 и 330 оборотов в минуту. В качестве исследуемой среды использовалось ванильное мороженое. Также проводились исследования с использованием раствора сахарозы в качестве модельной среды. Авторы выделяли два потока внутри теплообменника: вблизи стенок, где происходит кристаллизация и вблизи ротора скребковой мешалки. Между этими зонами осуществляется радиальное перемешивание. Линейная скорость потока вблизи охлаждающей поверхности была ниже. Время пребывания продукта в различных зонах рабочего цилиндра определялось путём добавления в эти зоны индикатора и определения его концентрации на выходе по следующему принципу:

$$\omega_{\text{Вых}}\{t\} = \alpha\omega_1\{\chi = L, t\} + (1 - \alpha)\omega_2\{\chi = L, t\},$$

где: L – длина рабочего цилиндра, м;

ω_1 и ω_2 – массовая доля индикатора в ядре потока и вблизи стенок соответственно;

α – доля потока, протекающая через зону вблизи стенок;

$\omega_{\text{Вых}}$ – массовая доля индикаторной жидкости на выходе из аппарата.

χ – параметр массообмена между двумя областями.

Данное выражение можно представить в виде рисунка 1.

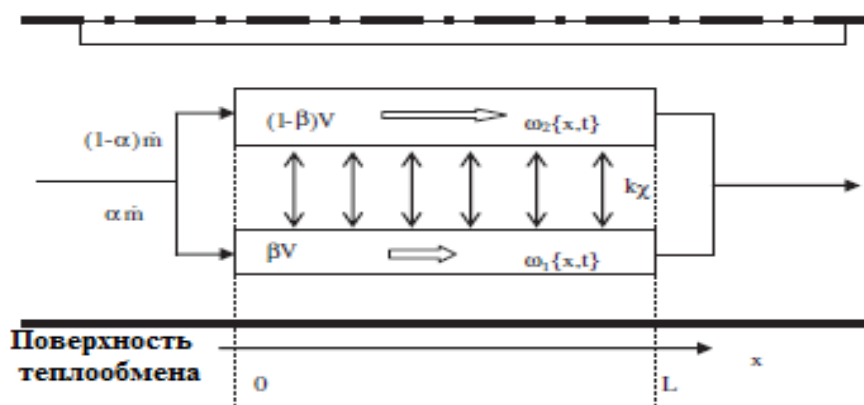


Рис. 1. Модель потоков в цилиндре скребкового фризера

Дюмонт и другие [7] исследовали теплообменник с очищаемой поверхностью. Исследовались характеристики потока обрабатываемого продукта, в частности рассматривалось влияние вихрей, образуемых скребковыми устройствами. Теплообменник имел рабочий цилиндр диаметром 0,13 м и длиной 0,60 м. Диаметр ротора мешалки равнялся 0,08 м. В качестве рабочей среды использовался раствор гуаровой камеди. Автором были получены значения коэффициента консистенции и индекса течения, представленные в таблице:

Физические свойства растворов гуаровой камеди при 25°C

Содержание гуаровой камеди, %	Плотность, кг/м ³	Индекса течения	Коэффициент консистенции, Па·с
0,7	1046	0.47	1.31
0,8	1046	0.44	2.04
1	1043	0.36	4.86
1,2	1047	0.32	8.91

Необходимо отметить, что зафиксированное авторами [7] влияние образующихся между лопастями вихрей, выражено менее сильно, чем аналогичное явление, рассмотренное в работе [4]. Из этого следует, что эффект дополнительной турбулизации охлаждаемой среды вихревыми потоками сильно зависит от конструкции аппарата и параметров среды.

Ареллано и соавторы [8] проводили исследования теплообменника с очищаемой поверхностью. Аппарат использовался для охлаждения смеси лимонного щербета после пастеризации. Используемый для экспериментов теплообменник представлен на рисунке 2. Аппарат имел два скребка. Диаметр вытеснительного барабана 3 составлял 0,046 м; внутренний диаметр теплопередающего цилиндра 6 равнялся 0,05 м. Поверхность теплообмена составляла 0.0628 м². Производительность аппарата составляла 0.007–0.021 кг/с. Частота вращения скребковой мешалки задавалась в диапазоне 9,1–16,7 с⁻¹.

Вывод

В ходе исследований было установлено, что изменение частоты очищения поверхности для исследованного аппарата слабо влияет на производительность. Авторы объясняли это тем, что рост энергии трения скребковых устройств компенсирует улучшение теплообмена за счёт лучшего очищения поверхности. Рассмотренное явление диссипации энергии вращения рассматривалось в более ранних исследованиях, в частности в работах А.К.Никитина, И.В. Доманского, В.Н. Соколова и других. Установлено, что энергия, затраченная на перемешивание, может оказывать значительное влияние на параметры теплообменных аппаратов.

Из рассмотренных работ [9, 10] можно сделать вывод о том, что при исследовании теплообменников с очищающими устройствами необходимо учитывать влияние конструкции скребка на турбулизацию обрабатываемой среды. Необходимо также учесть влияние диссипируемой энергии, что может быть использовано на практике для выявления максимально эффективного режима работы аппарата.

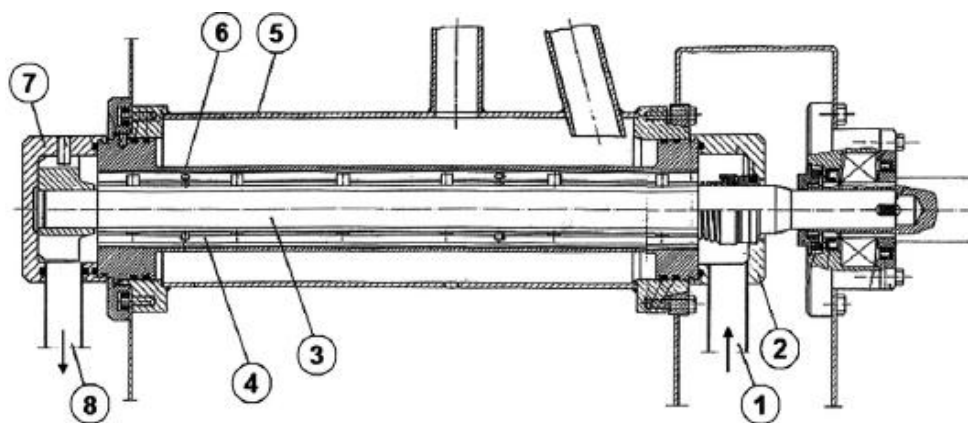


Рис. 2. Схема скребкового теплообменника, использованного для охлаждения лимонного шербета:

1 – входной патрубок для смеси шербета; 2 – задняя крышка; 3 – вытеснительный барабан; 4 – скребковые устройства; 5 – теплообменная рубашка; 6 – теплопередающий цилиндр; 7 – передняя крышка; 8 – выходной патрубок для смеси шербета

Литература (References)

1. Николаев Б. Л., Николаев Л. К. Исследование реологических свойств смеси мороженого «Сливочное крем-брюле» // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 2. [Nikolaev B. L., Nikolaev L. K. Issledovanie reologicheskikh svoystv smesi morozhennogo «Slivochnoe krem-bryule» *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv.* 2013. № 2].
2. Николаев Л.К., Денисенко А.Ф., Николаев Б.Л. Исследование вязкостных свойств сметаны с содержанием жира 15 процентов до и после перемешивания ее в емкостях // Процессы и аппараты пищевых производств. 2009. № 2. [Nikolaev L.K., Denisenko A.F., Nikolaev B.L. Issledovanie vyazkostnykh svoystv smetany s sodержaniem zhira 15 protsentov do i posle peremeshivaniya ee v emkostyakh. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv.* 2009. № 2].
3. Николаев Л.К., Денисенко А.Ф. Интенсификация процесса охлаждения маргариновых эмульсий // Процессы и аппараты пищевых производств. 2010. № 2. [Nikolaev L.K., Denisenko A.F. Intensifikatsiya protsessa okhlazhdeniya margarinovykh emul'sii. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv.* 2010. № 2].
4. Mabit J., Fayolle F., Legrand J. Shear rates investigation in a scraped surface heat exchanger. *Chemical Engineering Science.* 2003, no. 58, pp. 4667–4679.
5. Perez-Martinez J.D., Reyes-Hernandez J., Dibildox-Alvarado E., Toro-Vazquez J.F. Physical Properties of Cocoa Butter Vegetable Oil Blends Crystallized in a Scraped Surface Heat Exchanger. *Journal of the American Oil Chemists Society,* 2012, no. 89, pp.199–209.
6. Fayolle F., Belhamri R., Flick D. Residence time distribution measurements and simulation of the flow pattern in a scraped surface heat exchanger during crystallization of ice cream. *Journal of Food Engineering.* 2013, no. 116, pp. 390–397.
7. Eric Dumont, Francine Fayolle, Jack Legrand. Flow regimes and wall shear rates determination within a scraped surface heat exchanger. *Journal of Food Engineering.* 2000, no. 45, pp. 195–207.
8. Marcela Arellano, Hayat Benkhelifa, Graciela Alvarez, Denis Flick Experimental study and modeling of their residence time distribution in a scraped surface heat exchanger during sorbet freezing. *Journal of Food Engineering,* 2013, no. 117, pp.14–25.
9. Николаев Б.Л., Круподёров А.Ю., Кузнецов А.В., Николаев Л.К., Денисенко А.Ф., Дудина А.А. Экспериментальная установка для исследования тепловых процессов в поточных аппаратах с очищающими устройствами // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 2 [Nikolaev B.L., Krupoderov A.Yu., Kuznetsov A.V., Nikolaev L.K., Denisenko A.F., Dudina A.A. Eksperimental'naya ustanovka dlya issledovaniya teplovykh protsessov v potochnykh apparatakh s ochishchayushchimi ustroystvami. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv.* 2014. № 2].
10. Иванова А.С., Алексеев Г.В. Моделирование процесса натекания неньютоновской жидкости на жесткую преграду // Вестник Международной академии холода. 2012. № 1 [Ivanova A.S., Alekseev G.V. Modelirovanie protsessa natekaniya nen'yutonovskoi zhidkosti na zhestkuyu pregradu. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda.* 2012. № 1].