

В статье обоснованы исследования процессов конвективного теплообмена в реологических жидкостях с учетом температурного фактора, влияние которого особенно сказывается на вязкости неньютоновских сред. Разработана методика проведения эксперимента и создана экспериментальная установка. Проведены исследования по определению зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига, которая аппроксимируется обобщенным уравнением Гершеля–Балкли, а также исследования по определению теплопроводности исследуемых жидкотекучих пищевых продуктов. Получены экспериментальные зависимости.

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОБМЕН В РЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЯХ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА

РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию», г. Минск, Беларусь

- З. В. Ловкис, член-корреспондент ИАИП Беларуси, доктор технических наук, профессор, генеральный директор;*
А. А. Шепшелев, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе;
С. А. Арнаут, кандидат технических наук, старший научный сотрудник — руководитель опытно-экспериментальной группы

**ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Беларусь**

- Е. В. Коробко, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией реофизики и макрокинетики;*
С. В. Виланская, научный сотрудник лаборатории реофизики и макрокинетики;
Н. А. Журавский, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории реофизики и макрокинетики

Потребности современного пищевого производства призваны обеспечить исследования и инженерные разработки по реодинамике и тепломассообмену реологически сложных сред. Помимо больших прямых затрат на переработку таких сред на них затрачивается значительное количество различных видов энергии, в частности тепловой. Следовательно, обоснованный выбор и эффективное использование энергетического оборудования, систем переработки и транспортировки реологически сложных текучих сред (в первую очередь высоковязких) представляются, с энергетической точки зрения, важной народнохозяйственной проблемой. Надежность и повышение эффективности энергетического оборудования напрямую зависит от всесторонних исследований процессов гидродинамики и теплообмена в рабочих жидкостях.

В настоящее время ощущается недостаток исследований процессов конвективного теплообмена в реологических жидкостях с учетом температурного фактора, влияние которого особенно сказывается на вязкости неньютоновских сред. Следовательно, не существует надежных и достоверных критериальных зависимостей для теплогидравлических расчетов в рассматриваемых средах. Даже для высоковязких ньютоновских жидкостей в режиме смешанной конвекции до сих пор не учитывается зависимость физических свойств их от температуры, а при постоянных теплофизических свойствах жидкости до сих пор отсутствуют критериальные уравнения для коэффициента трения. В связи с обозначенными проблемами

и с тем, что в последнее время цены на энергоносители неуклонно повышаются, актуальность работы возрастает.

К основным тепловым процессам, применяемым в пищевой промышленности, относятся нагревание и охлаждение, испарение и выпаривание, сублимация и конденсация, замораживание и размораживание. Движущей силой данных процессов является разность температур. Тепловые процессы характеризуют коэффициент теплопроводности среды, коэффициент температуропроводности, коэффициент теплоотдачи и другие, существенно зависящие от реологических свойств обрабатываемых продуктов.

В неподвижных жидкостях и газах теплота переносится только за счет теплопроводности. Однако внутри жидкости или газа теплота может переноситься за счет перемешивания. Нагретые у стенки частицы, попадая в окружение холодных частиц, отдают им свою теплоту. Скорость переноса при этом тем выше, чем интенсивнее перемешивание, т. е. чем выше турбулизация потока теплоносителя.

Среди большого многообразия аппаратов для тепловой обработки пищевых сред можно выделить следующие виды: аппараты для нагревания, уваривания и варки; выпарные аппараты и установки; развариватели крахмалосодержащего сырья; заторные и суловарочные аппараты; ошпариватели и бланширователи для фруктов и овощей; автоклавы, пастеризаторы и стерилизаторы, а также экструдеры.

Данное оборудование предназначено для осуществления таких тепло-массообменных процессов, которые вызывают сложные физико-химические и структурно-механические изменения, связанные с поверхностным или объемным проникновением теплоты в продукт. Все это вызывает изменение агрегатного и структурного состояний продукта, размягчение растительных тканей, что способствует их разрушению и экстрагированию необходимых веществ, а также приводит к гибели микроорганизмов с предотвращением их развития.

Тепломассообменное оборудование по способу передачи теплоты можно разделить на аппараты смешения и поверхностные аппараты. В аппаратах смешения продукт вступает во взаимодействие с теплоносителем и нагревается. В поверхностных аппаратах теплота передается через стенку (рекуперативные теплообменники) или через насадку аппарата (регенеративные теплообменники).

Законы передачи тепла в пищевых продуктах, обладающих свойствами неньютоновских жидкостей, представляют особый интерес для изучения. Знания зависимости коэффициентов теплопередачи с учетом реологических свойств позволят получить методики расчета оптимальных технологических режимов процессов теплообмена с точки зрения обеспечения максимального качества продукта и минимальных энергозатрат.

В рамках выполнения задания Государственной программы прикладных научных исследований «Инновационные технологии в АПК» была разработана методика исследования реологических и теплофизических свойств, которая состоит из двух этапов. На первом этапе при помощи реометрических измерений определялась зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига, которая аппроксимируется обобщенным уравнением Гершеля–Балкли. На втором этапе на экспериментальной установке проводились исследования по определению теплопроводности исследуемых жидкотекучих пищевых продуктов и с использованием математического аппарата определялись зависимости теплофизических и реологических свойств от технологических факторов (температура, скорость течения и др.).

Результаты исследований по разработанной методике представлены на примере послеспиртовой зерновой барды, полученной на Бобруйском гидролизном заводе (Республика Беларусь) [1]. Были исследованы составы послеспиртовой зерновой барды из ржи ряда концентраций (табл.). Реологические измерения выполнены на вискозиметре Rheotest 2.1 в диапазоне температур $t = +20...+80$ °С и диапазоне скоростей сдвига $\dot{\gamma} = 3-437,4$ с⁻¹. Использовалась измерительная ячейка, состоящая из двух коаксиальных цилиндров. Задавалась скорость вращения внутреннего цилиндра, определяющая скорость сдвига в жидкости. Измерялся момент сил, действующий на цилиндр, по которому рассчитывалось напряжение сдвига.

Сухое вещество	Массовая концентрация сухого вещества, %
Рожь	27
—»—	22
—»—	20
—»—	18

Согласно результатам экспериментов реологическое поведение послеспиртовой зерновой барды из ржи может быть описано моделью Гершеля–Балкли [2]:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где τ — напряжение сдвига, Па; τ_0 — предельное напряжение сдвига, Па; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига, c^{-1} ; K — коэффициент консистенции, $\text{Па}\cdot\text{c}^n$; n — индекс течения.

В диапазоне до $+70^\circ\text{C}$ происходит снижение вязкости послеспиртовой зерновой барды с концентрацией 27 % в диапазоне температур $+20\dots+80^\circ\text{C}$, при дальнейшем возрастании температуры происходит ее увеличение. Изменения параметров модели Гершеля–Балкли для послеспиртовой зерновой барды из ржи с концентрацией 27 % в зависимости от температуры в диапазоне температур $+20\dots+80^\circ\text{C}$ могут быть аппроксимированы полиномами 4-й степени:

$$\tau_0 = 2E - 06t^4 - 0,0004t^3 + 0,0354t^2 - 1,2896t + 17,627 \quad (\text{Па}),$$

$$K = 3E - 06t^4 - 0,0007t^3 + 0,0578t^2 - 2,1376t + 32,006 \quad (\text{Па}\cdot\text{c}^n),$$

$$n = 2E - 07t^4 + 4E - 05t^3 - 0,0026t^2 + 0,0792t - 0,5376.$$

Диапазоны параметров модели Гершеля–Балкли для послеспиртовой зерновой барды из ржи с концентрацией 27 % в диапазоне температур $+20\dots+80^\circ\text{C}$ составляют:

$$\tau_0 = 0,04 - 2,92 \quad (\text{Па}), \quad K = 0,58 - 7,27 \quad (\text{Па}\cdot\text{c}^n), \quad n = 0,29 - 0,57.$$

Зависимость напряжения сдвига от концентрации при температуре $+20^\circ\text{C}$ в диапазоне концентраций 18–27 % является возрастающей. Изменение параметров модели Гершеля–Балкли для послеспиртовой зерновой барды из ржи в зависимости от концентрации в этих условиях можно аппроксимировать полиномами 2-й степени:

$$\tau_0 = -445,05C^2 + 220,02C - 24,072 \quad (\text{Па}),$$

$$K = 752,26C^2 + 397,41C - 45,226 \quad (\text{Па}\cdot\text{c}^n),$$

$$n = -1,5946C^2 + 1,1994C + 0,0779 \quad (n - \text{индекс течения при концентрации } C).$$

Диапазоны параметров модели Гершеля–Балкли для послеспиртовой зерновой барды из ржи при температуре $+20^\circ\text{C}$ в диапазоне концентраций 18–27 % составляют:

$$\tau_0 = 0,96 - 2,92 \quad (\text{Па}), \quad K = 1,77 - 7,27 \quad (\text{Па}\cdot\text{c}^n), \quad n = 0,24 - 0,29.$$

Для выполнения второго этапа была разработана и изготовлена экспериментальная установка теплофизических свойств Ш12-УТС. При разработке конструкторской документации Ш12-УТС за аналог был взят одноходовой теплообменник типа «труба в трубе», который состоит из 2 труб: наружной трубы большего диаметра и концентрически расположенной внутри нее трубы меньшего диаметра. Преимущества данного типа аппаратов:

- ♦ высокий коэффициент теплопередачи;
- ♦ простота изготовления.

Установка Ш12-УТС.00.000 выполнена в виде горизонтального цилиндра из нержавеющей трубы, установленного на опоры из листового нержавеющей материала (рис. 1). Для снижения

тепловых потерь торцевые фланцы сделаны из фторопласта (нерастворим в воде и не смачивается ею, высокая нагревостойкость (до +300 °С), выдерживает длительный нагрев (более 1000 ч) при +200 °С без изменения свойств, негорюч, широкий диапазон механических свойств, хорошие диэлектрические свойства, высокая электрическая прочность, низкий коэффициент трения). Установка имеет подающий патрубок, предназначенный для жидкотекучего пищевого продукта, который установлен в верхней части аппарата. В нижней части установки находится сливной патрубок, обеспечивающий удаление продукта из установки. Внутри находится нагревательный элемент — ТЭН — трубчатый электронагреватель. ТЭН применяется для получения тепловой энергии путем преобразования ее из электрической.

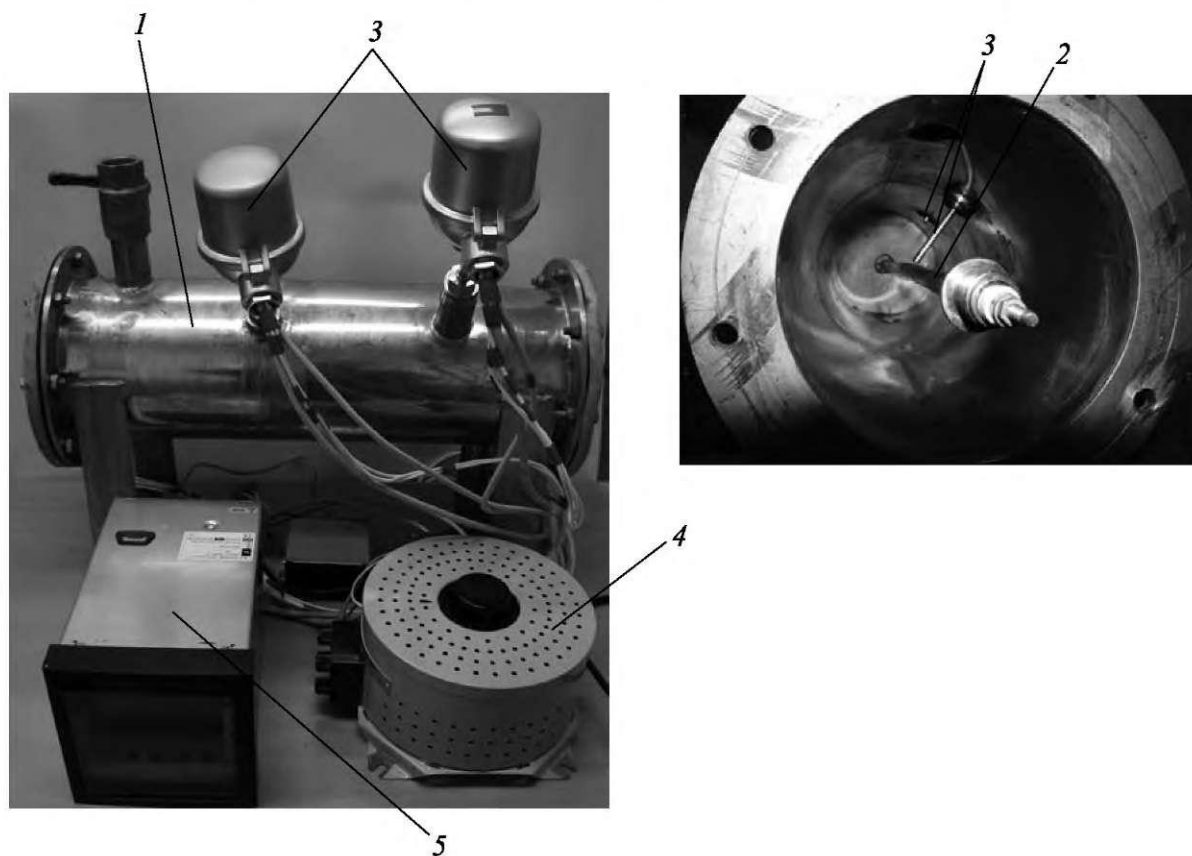


Рис. 1. Экспериментальная установка для определения теплопроводности жидкотекучих и пастообразных пищевых продуктов: 1 — корпус; 2 — нагревательный элемент; 3 — датчики температуры; 4 — ЛАТР; 5 — самописец

Установка работает следующим образом. Жидкотекучий пищевой продукт самотеком или при помощи насоса через подающий патрубок поступает в установку. При помощи лабораторного автотрансформатора осуществляется плавный нагрев ТЭНа. Для снятия данных температуры нагревательного элемента и жидкотекучего пищевого продукта у ТЭНа и цилиндрической стенки установлены датчики, передающие показания на электронный самописец.

На основании полученных экспериментальных данных по исследованию теплофизических свойств жидкотекучих пищевых продуктов были построены графические зависимости и получены уравнения, описывающие поведение жидкотекучих пищевых продуктов с учетом их теплофизических и реологических свойств (рис. 2).

Как видно из представленных на рис. 2 графических зависимостей, динамика нагрева воды имеет линейный характер, барды — степенной, именно поэтому при создании эффективных теплообменных аппаратов для охлаждения послеспиртовой барды необходимо по-

вышать коэффициент теплопередачи путем интенсивного перемешивания либо турбулизации среды.

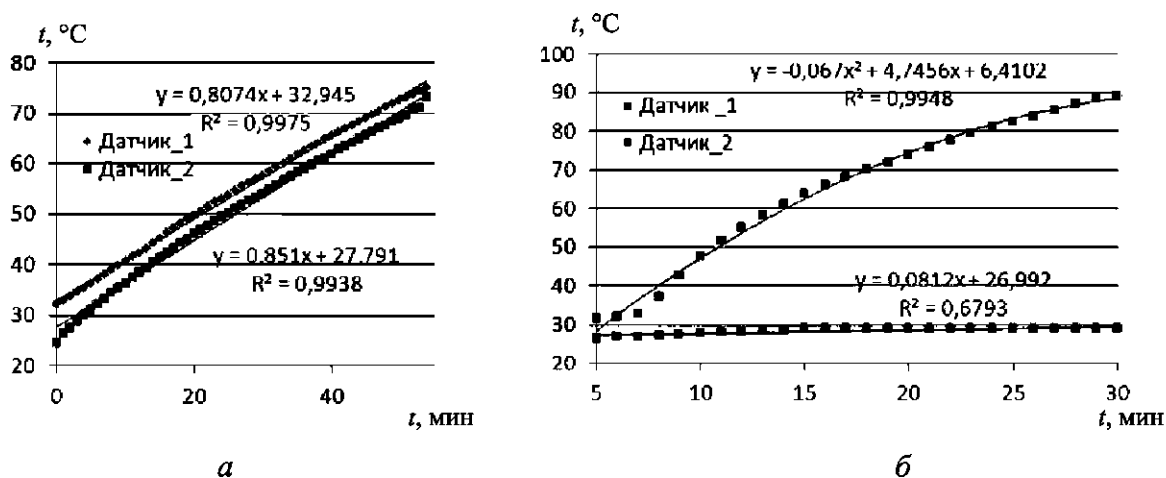


Рис. 2. Динамика нагрева среды: а — вода; б — барда

На основании проведенных исследований определена теплоемкость барды, которая составляет 4,04 кДж/(кг · К).

Полученные экспериментальные данные позволяют достоверно определить коэффициент теплопроводности исследуемых пищевых продуктов.

Таким образом, полученные реологические и теплофизические зависимости могут быть использованы не только для расчета расходно-напорных характеристик течения продуктов в технологических трубопроводах и элементах аппаратов для определения оптимальных режимов транспортировки продуктов, но и для разработки расчетных зависимостей по конструированию аппаратов пищевых производств с учетом специфики реологических и теплофизических свойств неньютоновских пищевых продуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование реологических свойств послеспиртовой зерновой барды из ржи в режимах непрерывного сдвига и крутильных деформаций / З. В. Ловкис [и др.] // Третья науч.-практ. конф. с междунар. участием «Управление реологическими свойствами пищевых продуктов», науч. конф. молодых ученых и специалистов, 15–16 ноября 2012 г., Москва. Сб. материалов; отв. ред. д. т. н., проф. С. А. Мачихин — М.: Издательский комплекс МГУПП, 2012. — С. 184–194.

2. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / С. В. Пономарев [и др.]; под ред. С. В. Пономарева. — М.: Физматлит, 2008. — 408 с.

Рукопись статьи поступила в редакцию 26.11.2012

**Z. V. Lovkis, A. A. Shepshelyev, S. A. Arnaut, E. V. Korobko, S. V. Vilanskaya,
N. A. Zhuravskij**

CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN RHEOLOGICAL FLUID TAKING INTO ACCOUNT THE TEMPERATURE FACTOR

In article researches of processes of convective heat exchange in rheological fluids taking into account the temperature factor which influence especially affects viscosity non-Newtonian mediums are proved. The technique of carrying out of experiment is developed and experimental installation is created. Researches by definition of dependence of shear stress from rate of shear which is approximated by generalised of Gershelja-Balkli equation are carried out. Researches by definition of heat conductivity probed of fluid foodstuff are carried out. Experimental dependences are received.