

И. Х. Исрафилов, А. Т. Галиакбаров, Э. Р. Юнусов,
И. А. Гайсин, Ю. В. Сарапулова

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПРОЦЕССЕ ЖАРКИ ТЕСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ВО ФРИТЮРНОМ МАСЛЕ

Ключевые слова: тепломассообмен, численное моделирование, уравнение подобия.

В статье приведены результаты расчета численной модели фритюрницы для жарки тестовых заготовок и сравнение их с опытными данными с целью определения точности модели. На основе параметров используемого уравнения подобия вычислен коэффициент теплоотдачи от трубчатых электронагревателей к фритюрному маслу.

Keywords: heat and mass transfer, numerical modeling, similarity equation.

The results of the calculation of the numerical model of the fryer for frying semifinished products of dough and a comparison with experimental data to determine the accuracy of the model are presented. Based on the parameters of the similarity equation the coefficient of heat transfer from a tubular electric fryer to oil was calculated.

Введение

Технология производства мучных кондитерских изделий, приготовленных фритюрным способом, представляет собой трудоемкий и продолжительный процесс. В производстве мучных кондитерских изделий основными процессами являются нагрев фритюрного масла и обжарка тестовых заготовок в нем. Перенос теплоты при нагреве масла осуществляется конвекцией.

В данной работе приводятся расчетные и экспериментальные исследования теплообменных процессов во фритюрнице. Для расчета теплообменных процессов, происходящих при эксперименте, проведено численное решение. Приведены результаты сравнения физического эксперимента и численного моделирования теплообменных процессов, происходящих в процессе нагрева масла во фритюрнице.

Численное моделирование

Рассматривается задача конвективного теплообмена между жидкостью и трубчатыми электронагревателями фритюрницы, которая моделируется на основе геометрической модели пористых сред.

Математическое описание конвективного теплообмена описывается общим дифференциальным уравнением переноса вещества, законом Фурье для теплопереноса и дифференциальным уравнением конвективной диффузии для массопереноса.

Общее дифференциальное уравнение переноса субстанции (1):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\varphi \vec{v}) = -\operatorname{div} \vec{q} + I_V \quad (1)$$

где τ – время, с; I_V – объемная мощность внутренних источников или стоков.

При этом используем потенциал переноса в виде:

$$\varphi = \rho C_p T, \quad (2)$$

где ρ – плотность, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); T – температура, К; φ –

изменение количества теплоты в единице объема среды, Дж/м³.

В качестве соотношения, определяющего необратимый перенос, используется закон Фурье:

$$\vec{q} = -\lambda \operatorname{grad} T, \quad (3)$$

где λ – теплопроводность масла, Вт/м·К.

С предположением, что рассматриваемое тело изотропно, т.е. теплопроводность λ не зависит от направления, но меняется во времени, получим уравнение переноса теплоты (4):

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho C_p T) + \operatorname{div}(\rho C_p T \vec{v}) = \operatorname{div}(\lambda \nabla T) + I_t, \quad (4)$$

где I_t – плотность внутренних источников (стоков) энергии; $\vec{v}$ – скорость движения среды, м/с.

Массоперенос осуществляется за счет конвективной диффузии.

Дифференциальное уравнение конвективной диффузии для массопереноса (5):

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + I_V, \quad (5)$$

где C – концентрация распределяемого вещества, кг/м³; D – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; v – вектор скорости движения среды [1].

Решение приведенных выше дифференциальных уравнений производится при помощи численного моделирования. Это позволит учесть больше особенностей конкретного процесса. Решение будет заключаться в вычислении функционала при заданных граничных условиях и начальных условиях непрерывности:

1) Трехмерная неподвижная модель; 2) Нестационарный процесс; 3) Однокомпонентный материал – жидкость (масло); 4) Модель разделенного течения – конвекция, вторичный градиент (поперечная диффузия);

Начальные условия непрерывности:

1) Давление – метод постоянного скалярного профиля; 2) Скорость – постоянный векторный профиль; 3) Статическая температура.

Конвективное выражение на поверхности:

$$[\phi \rho (v \cdot a - G)]_f = (m\phi)_f = m_f \phi_f \quad (6)$$

Поток массы на поверхности:

$$G_f = (a \cdot v_g)_f \quad (7)$$

Диффузия потока:

$$D_f = \Gamma_f \nabla \phi_f a = \Gamma_f [(\phi_1 - \phi_0) \bar{a} \cdot a + \overline{\nabla \phi} \cdot a - (\overline{\nabla \phi} \cdot ds) \bar{a} \cdot a] \quad (8)$$

Начальные условия, представленные в таблице 1, касаются в основном физико-механических свойств фритюрного масла. Начальная температура масла $T_o = 346 \text{ K}$ обусловлена технологическими требованиями.

Моделирование производилось в программе STAR-CCM+, которая использует подход к моделированию, основанный на задании физических моделей в специальном меню и предоставляет полный контроль над процессом решения. Первым шагом численного моделирования является построение трехмерной сеточной модели в расчетной области на основе автоматических построителей поверхностей и объемной сетки программы STAR-CCM+. При этом предварительно исходная геометрическая модель фритюрницы, на основе которой создается поверхностная сетка, освобождается от ряда несущественных деталей, не

оказывающих влияния на термодинамическое поведение системы.

Таблица 1 – Начальные условия

Параметр	Температура T_o , K	Динамическая вязкость μ , Pa·c	Коэффициент теплового расширения β , K ⁻¹	Плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность λ , Вт/м·K	Удельная теплоемкость c_p , Дж/кг·K
Значение	346	$12,75 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	865	0,168	1988

Численное решение этих уравнений на основе граничных условий позволило получить следующие данные: график изменения температуры от времени разогрева масла, скалярное распределение температуры в объеме, векторное распределение скоростей частиц масла при конвекции, представленных на рис. 1,2.

Как видно из рис. 1. трубчатые электронагреватели (ТЭН) расположены по центру объема масла, над ними находится наиболее темная область температурного поля, что свидетельствует о высокой температуре порядка $T = 170 - 173^\circ \text{C}$. Под ТЭНами температурное поле имеет светлый тон, с температурой порядка $T = 133 - 135^\circ \text{C}$.

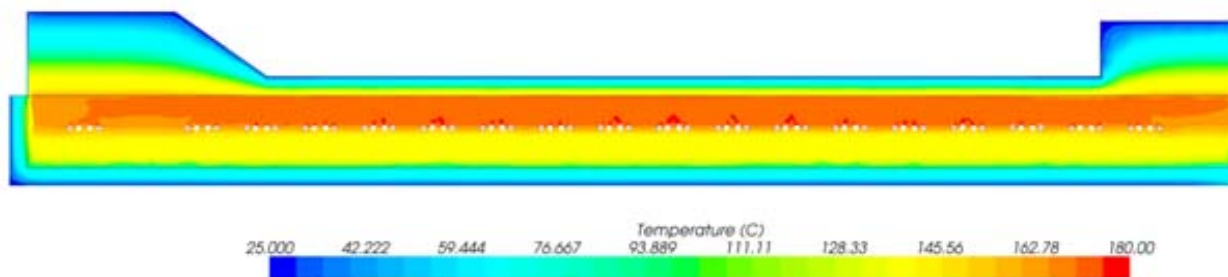


Рис. 1 – Скалярное распределение температуры в объеме масла

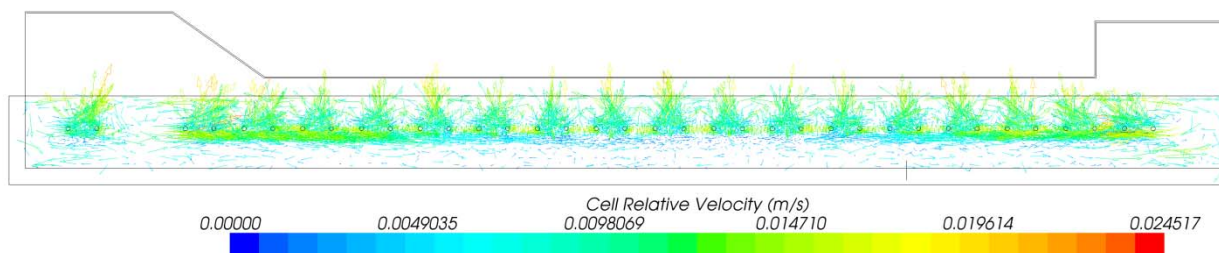


Рис. 2 – Векторное распределение скоростей частиц масла

На рисунке рис. 2. изображены направления движения частиц масла, а цвет векторов зависит от скорости движения этих частиц. Над ТЭНами происходит интенсивное движение частиц масла вверх со скоростью $v = 0,013 - 0,022 \text{ м/с}$. Из рис. 1, 2 видно, что на днище фритюрницы застойные зоны, объясняется это формой днища, не позволяющей прогреть эти зоны.

Экспериментальные исследования

Целью экспериментальных исследований является подтверждение численной модели. Экспериментальные исследования проводились на промышленном аппарате, в производственных условиях, не прерывая технологического процесса. При эксперименте были установлены термодатчики, показания с которых передавались на систему сбора

данных МТ-1860 цифрового мультиметра АМ-1172. Процесс нагрева путем конвекции проводился во фритюрнице с трубчатыми электронагревателями (ТЭН).

Продолжительность нагрева определяется временем необходимым для достижения 140°C в центре объема масла на одном уровне с ТЭНами при их суммарной мощности 39,6 кВт.

Значения, полученные при помощи численной модели, были сопоставлены с экспериментальными значениями изменения температуры во времени. Модель показала хорошие результаты сходимости и используется для оценки теплообменных процессов во время нагрева фритюрницы.

На рис. 3 представлены графики экспериментальных и полученных при численном моделировании значений изменения температуры масла во время нагрева, характерных для исследуемого процесса.

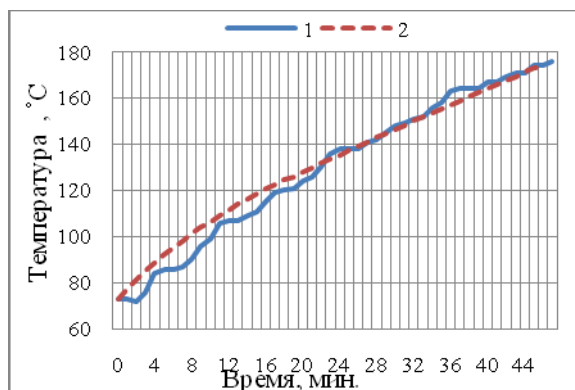


Рис. 3 – Среднемассовая температура фритюрного масла (1 – экспериментальные значения, 2 – значения, полученные при моделировании)

Верификация разработанной компьютерной модели проводится путем сравнения численных и экспериментальных результатов по установившимся температурам в выбранных точках. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений температур показывает, что для всех точек данные весьма близки. Для определения количественного расхождения модели с экспериментальными данными используется среднеквадратичное отклонение между измеренными и полученными при моделировании значениями изменения температуры во время нагрева масла.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_{\text{эксп}} - T_{\text{мод}})^2} = 4,47^{\circ}\text{C},$$

где $T_{\text{эксп}}$ и $T_{\text{мод}}$ – экспериментальные и полученные при моделировании значения температур соответственно.

В целом, данные расчетов и испытаний подтверждают достоверность компьютерного моделирования процесса теплообмена.

Было решено использовать данные численного расчета для определения коэффициента теплоотдачи α от ТЭНа к маслу.

Механизм теплообмена связан с объемным кипением, в котором помимо конвекции жидкости происходит дополнительный перенос массы вещества и теплоты паровыми пузырями у пограничного слоя возле ТЭНов в объем нагреваемого масла.

Уравнение подобия включает в себя критерии подобия, в которые входит теплофизические свойства жидкости, зависящие от температуры. Так число Pr капельных жидкостей сильно зависит от температуры, причем для большинства жидкостей эта зависимость в основном аналогична зависимости кинематической вязкости $\nu(t)$, так как теплоемкость и коэффициент теплопроводности зависят от температуры более слабо. Как правило, при увеличении температуры число Pr резко уменьшается (рис.4) [2].

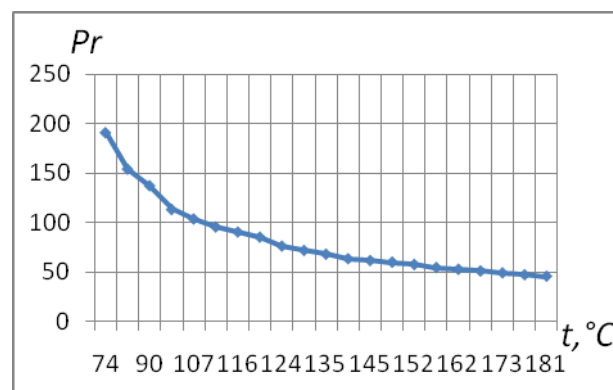


Рис. 4 – Изменение числа Прандтля фритюрного масла в зависимости от температуры

Опытные данные по теплоотдаче горизонтальных трубных пучков в условиях кипения при конвективном теплообмене в большом объеме обобщаются с помощью системы чисел подобия, которая использована в уравнении подобия $Nu = c Re^n Pr_{\text{жс}}^{1/3}$ [2]. Применительно к пучкам труб, она дополняется сомножителями, учитывающими число рядов труб и относительный шаг между трубами. При параметре $Re(n+1) \geq 10$ для стальных и медных труб получена единая зависимость для теплоотдачи:

$$Nu = 0,648 Pr^{1/3} [Re(n+1)]^{1/3} \left(\frac{s}{d}\right)^{-0,45} = 12,6,$$

где n – число рядов труб в направлении действия конвекции; s – расстояние между трубами; d – диаметр.

В связи с изменением других теплофизических свойств фритюрного масла, таких как плотность ρ , коэффициент температуропроводности a , был произведен уточненный расчет коэффициента теплоотдачи, величина которого составляет $144 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$.

Нагрев фритюрного масла происходит с кипением, что вызывает увеличение коэффициента теплоотдачи по сравнению с обычным режимом нагрева.

Выводы

В результате проведенных численных исследований теплообменных процессов, происходящих во фритюрнице, с использованием программы STAR CCM+ были получены поля распределений температуры и скорости частиц масла во фритюрнице. Анализ этих полей показал, что во фритюрнице устанавливается циркуляция масла, обусловленная конвекцией.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для различных вариантов показало хорошее совпадение результатов. Среднее отклонение между результатами, полученными в ходе численного моделирования и эксперимента, составляет 4,5°C.

Проведение расчетно-экспериментальных исследований теплообменных процессов во фритюрнице позволяет верифицировать численную модель и доказывает ее применимость к решению рассматриваемого класса задач.

В дальнейшем результаты, полученные в процессе моделирования, помогут при оптимизации работы фритюрницы.

Литература

1. Алексеев Г.В., Вороненко Б.А., Лукин Н.И. Математические методы в пищевой инженерии: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 110-115 с.
2. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. Учебник для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1975. – 270-273 с.
3. Тютюнников Б.Н. Химия жиров. – М.: Колос, 1992. – 448 с.
4. Фукс Г. И., Вязкость и пластичность нефтепродуктов, М., 1956. – 328 с.
5. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 420-428, 515 с.

© **И. Х. Ибрафиллов** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. высокоэнергетической и пищевой инженерии НЧИ (филиал) К(П)ФУ, igmaris@yandex.ru; **А. Т. Галиакбаров** – канд. техн. наук, доцент той же кафедры; **Э. Р. Юнусов** – магистрант той же кафедры; **И. А. Гайсин** – магистрант той же кафедры; **Ю. В. Сарапулова** – магистрант той же кафедры.