

ТЕПЛООБМЕН НА ПОВЕРХНОСТИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ В СРЕДЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

А.А. Смоляк, Д.А. Смагин

Изучены особенности протекания процесса теплообмена на поверхности пищевых продуктов при их тепловой обработке в среде перегретого водяного пара в технологических аппаратах с негерметизированной рабочей камерой. Показано, что интенсификация процесса жарки обусловлена наличием конденсационных процессов на начальной стадии обработки. Определена температура поверхности, при которой происходит переход от процесса теплоотдачи при наличии конденсации к процессу теплоотдачи за счет свободной конвекции, и минимальная рекомендуемая температура для реализации жарочных процессов в среде перегретого пара.

Введение

Одним из наиболее широко распространенных способов тепловой обработки кулинарных изделий является жарка в газовых средах. Традиционно для этой цели применяют нагретый воздух. При всех прочих преимуществах данный теплоноситель обладает существенным недостатком: характеризуется относительно длительной продолжительностью тепловой обработки пищевых продуктов. Поэтому для ускорения тепловой обработки пищевых продуктов в последнее время активно применяется перегретый водяной пар, позволяющий значительно сократить продолжительность тепловой обработки обрабатываемых изделий.

Как показывает обзор литературных источников, проводилось значительное количество исследований, посвященных изучению процесса нагревания пищевых продуктов при тепловой обработке в среде перегретого водяного пара [1–7]. Однако данные работы связаны с описанием тепломассообменных процессов, протекающих во внутренних слоях различных пищевых продуктов [1–5]. Только отдельные из них посвящены определению общего коэффициента теплоотдачи от перегретого водяного пара в условиях свободной конвекции и конденсации [6, 7]. Теплообмен на поверхности изделий практически не изучался, хотя интенсификация тепловой обработки продуктов главным образом определяется динамикой протекания тепловых процессов на их поверхности.

Особенностью процесса жарки является образование на поверхности продукта корочки. При тепловой обработке в среде нагретого воздуха поверхность изделий быстро подсушивается с образованием корки, температура которой переменная и выше температуры насыщения водяного пара при атмосферном давлении. При обработке в перегретом водяном паре температура на поверхности изделий на начальном этапе ниже температуры насыщения водяного пара. При этом происходит конденсация пара с образованием конденсатной пленки, которая увлажняет поверхность. В дальнейшем с ростом температуры на поверхности заготовки выше температуры насыщения конденсатная пленка разрушается и исчезает. Отсутствие влаги на поверхности изделия приводит к образованию на внешней оболочке поджаристой корочки. Поэтому теоретически процесс нагревания поверхности продуктов при тепловой обработке в среде перегретого водяного пара можно разделить на три стадии.

1. Температура поверхности изделия $t_{\text{пов}}$ ниже температуры насыщения водяного пара $t_{\text{н}}$. На поверхности происходит конденсация пара. Пар отдает пленке конденсата и через нее изделию теплоту фазового перехода и теплоту перегрева. Кроме того, конвективной теплоотдачей к пленке подводится часть теплоты несконденсировавшегося пара. Величина коэффициента теплоотдачи значительно превышает коэффициент теплоотдачи от нагретого воздуха.

2. Средняя температура по поверхности изделия равна температуре насыщения водяного пара. При этом локальные температуры заметно различаются в зависимости от ориентации поверхности. В этом случае на части поверхности изделия, где $t_{\text{пов}} \geq t_{\text{н}}$, конденсация пара прекращается. На отдельных участках, где $t_{\text{пов}} < t_{\text{н}}$, процесс конденсации сохраняется, что определяет наличие высоких тепловых потоков на этих участках поверхности. Средний по

поверхности коэффициент теплоотдачи уменьшается, но остается выше, чем при свободной конвекции, что обуславливается частичной конденсацией водяного пара.

3. Температура поверхности изделия выше температуры насыщения водяного пара. Конденсация отсутствует. Процесс теплоотдачи при этом осуществляется за счет свободной конвекции. Перегретый водяной пар и нагретый воздух характеризуются близкими значениями основных переносных свойств – теплоемкости и кинематического коэффициента вязкости. Это обуславливает небольшое отличие расчетных значений коэффициента теплоотдачи конвекцией. Однако водяной пар, будучи трехатомным газом (H_2O), обладает большей степенью поглощения и излучения лучистой энергии по сравнению с воздухом, являющимся смесью двухатомных диатермичных газов. Поэтому для среды перегретого водяного пара должна возрасти роль передачи теплоты к обрабатываемому продукту излучением, что способствует увеличению теплового потока в условиях теплоотдачи при свободной конвекции по сравнению с нагретым воздухом.

Целью данной работы является изучение процесса теплоотдачи к поверхности пищевых продуктов при тепловой обработке в среде перегретого водяного пара.

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальные исследования с целью изучения процесса теплообмена и проверки изложенных предположений проводились на модели, представляющей собой теплообменник в виде трубки, установленной в рабочей камере теплового аппарата и охлаждаемой протекающей внутри водой. При проведении исследований ставилась задача максимально возможного приближения условий проведения эксперимента к процессам, происходящим в реальных технологических аппаратах.

Моделирование теплового процесса включает в себя две самостоятельные задачи: необходимость осуществления процесса, подобного процессу, происходящему на поверхности пищевых продуктов, и необходимость выполнения на модели всех требуемых измерений. Модель в виде охлаждаемой трубки позволяет поддерживать на время измерений фиксированную температуру на поверхности, создавать и определять численно стационарный тепловой поток классическими методами. Кроме того, это позволит исключить влияние других факторов и погрешностей, которые могут иметь место при проведении эксперимента на реальных пищевых продуктах.

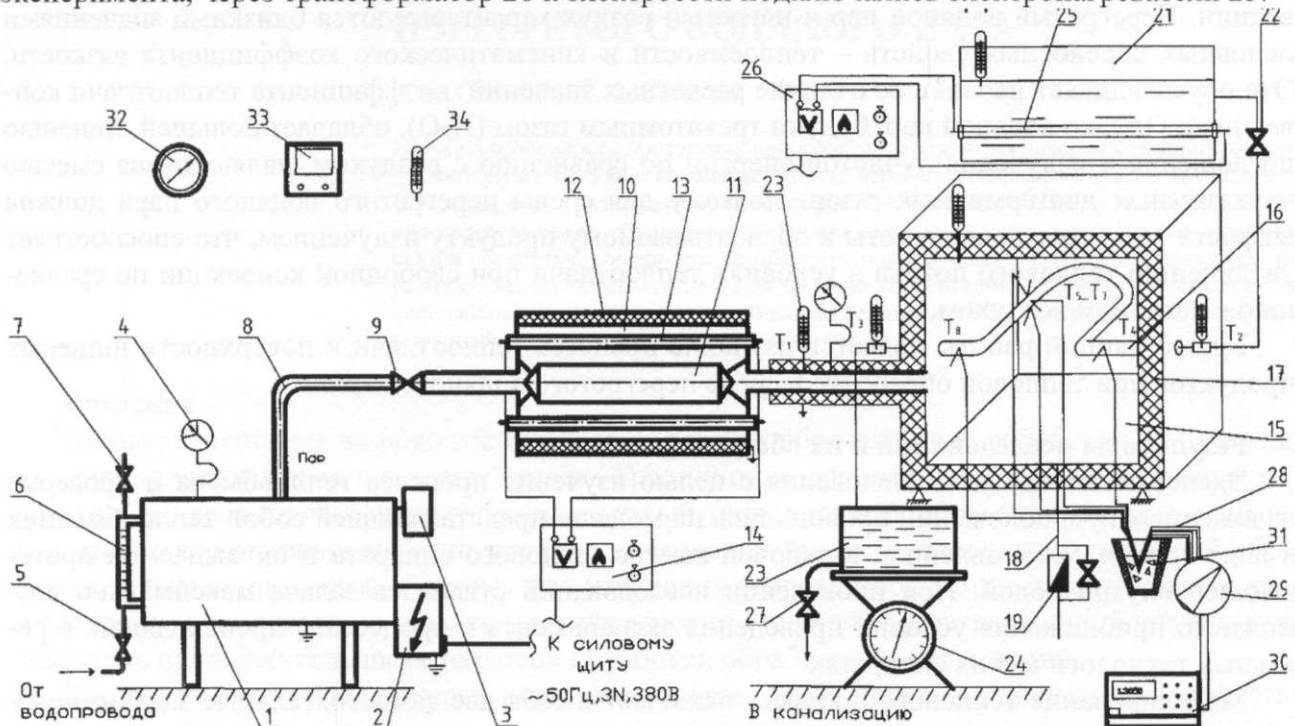
Процессы теплоотдачи, происходящие при нагревании пищевых продуктов, аналогичны процессам, происходящим при нагревании поверхности трубки теплообменника, т.е. имеют одинаковую физическую природу и описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями. Таким образом, соблюдается первое условие подобия.

Диаметр трубки (22 мм) подбирался в соответствии с толщиной большинства пищевых продуктов и кулинарных изделий (котлеты, шницели, колбаса, картофель и корнеплоды среднего размера, рыба и другие изделия). Форма трубчатого теплообменника соответствует форме многих пищевых продуктов, в том числе значительной части сортов корнеплодов, большинства рубленых изделий и т.д. Расположение датчиков по окружности трубки теплообменника позволяет моделировать процесс на поверхностях пищевых продуктов различной ориентации. Физические условия однозначности для теплоотдачи полностью идентичны, т.к. используется один и тот же теплоноситель. Процессы теплоотдачи к поверхности пищевых продуктов и трубки теплообменника могут быть описаны одноименными критериями подобия с одинаковыми значениями. Таким образом, соблюдаются все основные условия подобия. Принципиально-конструктивная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1. Внешний вид стенда в сборочном виде показан на рисунке 2.

Проведение экспериментальных исследований осуществлялось следующим образом.

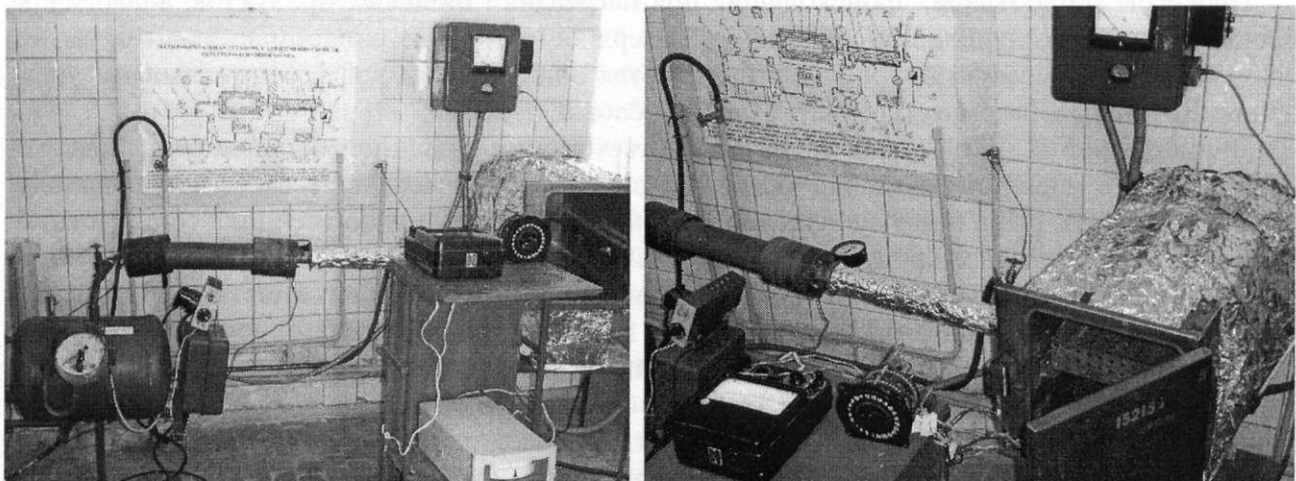
Парогенератор 1 заполнялся водой открытием вентиля 5 до достижения уровня воды на 3–5 см выше красной отметки уровнемерного стекла 6. С помощью отвертки устанавливался предел давления на электроконтактном манометре 4. Парогенератор 1 включался в электрическую сеть с пульта управления 2. После продувки системы (удаления из нее воздуха), о

чем свидетельствовала ярко выраженная струя пара на выходе из вентиля 7, открывался вентиль 22 подачи воды в трубу теплообменника 16 и вентиль 27 слива воды из приемного бака 23. Для подогрева воды в питательном баке 21 до температуры, обусловленной условиями эксперимента, через трансформатор 26 к электросети подключались электронагреватели 25.



1 – парогенератор, 2 – пульт управления, 3 – предохранительный клапан, 4, 20 – манометр, 5, 7, 9, 22, 27 – вентиль, 6 – уровенерное стекло, 8 – паропровод, 10 – пароперегреватель, 11 – обтекатель, 12 – тепловая изоляция, 13 – ТЭН, 14, 26 – трансформатор, 15 – рабочая камера, 16 – теплообменник, 17 – теплоизоляция, 18 – конденсаторпровод, 19 – конденсатоотводчик, 21 – питательный бак, 23 – приемный бак, 24 – весы, 25 – ТЭН, 28 – термоэлектрические преобразователи, 29 – переключатель, 30 – милливольтметр, 31 – сосуд Дьюара, 32 – секундомер, 33 – барометр, 34 – термометр

Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда



а

б

а – вид сбоку; б – вид сверху

Рисунок 2 – Внешний вид экспериментального стенда

Количество подаваемого в систему пароперегреватель-камера влажного насыщенного пара регулировалось паровым вентилем 9. Вентилем 22 регулировался расход воды через теплообменник 16. В таком состоянии экспериментальная установка подготовлена к проведению опытов. Для получения водяного пара в перегретом состоянии и дальнейшего проведения эксперимента с перегретым водяным паром включались электронагреватели 13 паропе-

регревателя с помощью автотрансформатора 14. Наличие обтекателя 11 позволяет создать кольцевой зазор между корпусом 10 и обтекателем 11, в котором расположены трубчатые электронагреватели 13, что способствует более эффективному перегреву водяного пара. Регулируя питающее напряжение электронагревателей 13 и 25 с помощью автотрансформаторов 14 и 26, можно получить соответственно различную температуру перегрева пара в системе пароперегреватель-камера и подогрева воды в питательном баке 21.

Подготовка к снятию экспериментальных данных продолжалась до тех пор, пока установка не разогреется и не наступит стационарный режим ее работы, который при подаче постоянного количества пара и воды одинаковой температуры характеризуется постоянством температуры воды на выходе из теплообменника 16.

Расход воды через трубку теплообменника определялся по изменению ее массы в приемном баке за определенное время. Масса приемного бака 23 фиксировалась с помощью весов 24. Взвешивание емкости с водой осуществлялось электронными весами SC 6010 с абсолютной погрешностью измерений до 0,1 г. Время наполнения бака определялось секундомером. Для измерения температуры на поверхности трубки по ее окружности были зачеканены четыре термопары ТХА₆₈, работающие в комплекте с милливольтметром типа В7-53. Погрешность измерения температуры с помощью термопар при этом составляла 0,5°C. Температура воды на входе и выходе из трубки, а также температура пара в рабочей камере измерялась ртутными термометрами с точностью измерения 0,25°C.

Эксперимент по исследованию процесса теплоотдачи заключался в измерении после наступления стационарного режима установки следующих величин:

- температуры греющего пара в рабочей камере;
- температуры на поверхности стенки в точках установки термопар;
- температуры воды, поступающей в теплообменник, и выходящей из него;
- массы приемного бака до и после проведения эксперимента;
- время изменения массы приемного бака.

Эксперимент производился при расходе воды через теплообменник в пределах 0,003–0,006 кг/с.

Средний по окружности коэффициент теплоотдачи от перегретого водяного пара к поверхности трубки теплообменника определяется из уравнения теплоотдачи:

$$\alpha_n = \frac{q}{t_n - t_c}, \quad (1)$$

где α_n – теплоотдача от пара к стенке теплообменника, Вт/(м²·К);

q – плотность передаваемого теплового потока, Вт/м²;

t_n – температура пара, °С;

t_c – средняя температура на поверхности стенки теплообменника, °С.

Тепловой поток Q , Вт, отдаваемый паром, определялся по выражению

$$Q = G_B c_B (t_{B1} - t_{B2}), \quad (2)$$

где G_B – расход воды, кг/с;

c_B – теплоемкость воды, кДж/(кг·К); при средней температуре воды в трубке принято $c_B = 4,174$ кДж/(кг·К) [10, табл. П-4];

t_{B1} и t_{B2} – соответственно температура воды на входе и выходе из трубки теплообменника, °С.

Расход воды определялся по изменению массы воды в приемном баке за измеренный интервал времени.

Плотность теплового потока определялась как

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (3)$$

где F – площадь поверхности теплообмена, м², $F = \pi dl$;

d – диаметр трубки, м;

l – длина трубки, м.

С целью оценки достоверности экспериментальных данных были проведены настроечные эксперименты при температуре перегретого пара 200°C на нескольких расходах охлаждаемой воды. Температура воды на входе в теплообменник при этом поддерживалась равной $t_{в1} = 84-86^\circ\text{C}$.

В этих экспериментах коэффициент теплоотдачи от пара к стенке трубки определялся также расчетно-опытным путем. Для этого сначала по результатам эксперимента находился коэффициент теплопередачи от греющей среды к воде:

$$k = \frac{q}{t_n - t_c} \quad (4)$$

Затем расчетным путем находился коэффициент теплоотдачи от стенки трубки к воде. При принятых расходах воды в трубке наблюдается ламинарный режим течения.

Средняя теплоотдача при ламинарном режиме течения жидкости в гладких трубах круглого поперечного сечения при $0,06 < \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} < 10$ и $\frac{l}{d} > 10$ описывается уравнением [10]

$$Nu_{жс,d} = 1,4 \left(Re_{жс,d} \frac{d}{l} \right)^{0,4} Pr_{жс}^{0,33} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (5)$$

где $Nu_{жс,d}$ – число Нуссельта, характеризующее интенсивность конвективного теплообмена;

Pr – число Прандтля;

d – диаметр трубки теплообменника, м

l – длина трубки теплообменника, м;

Re – число Рейнольдса;

Индексы «ж», «с» означают, что физические свойства выбираются по средней температуре жидкости и стенки соответственно.

За определяющую температуру принималась средняя температура воды в трубке теплообменника, а за определяющий размер – внутренний диаметр трубки теплообменника.

По значению числа Нуссельта коэффициент теплоотдачи к воде равен

$$\alpha_s = \frac{Nu_{жс,d} \cdot \lambda}{d}, \quad (6)$$

где λ – теплопроводность воды, Вт/(м·К).

Термическое сопротивление стенки трубки пренебрежительно мало:

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,001}{384} = 2,6 \cdot 10^{-6} \approx 0. \quad (7)$$

Здесь δ – толщина теплопередающей стенки теплообменника, м (для исследуемого теплообменника $\delta = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}$);

λ – теплопроводность теплопередающей стенки теплообменника, Вт/(м·К) (для меди $\lambda = 384 \text{ Вт/(м·К)}$ [10, табл. П-2]).

При этом условием влиянием величины термического сопротивления стенки при расчете коэффициента теплопередачи можно пренебречь. Таким образом, коэффициент теплоотдачи от перегретого водяного пара к поверхности теплообменника может быть найден из соотношения

$$\alpha_n = \frac{1}{\frac{1}{k} - \frac{1}{\alpha_s}} \quad (8)$$

Значения экспериментальных и опытно-расчетных значений коэффициента теплоотдачи от пара к стенке трубки для разных значений расхода воды (скорости потока) через теплооб-

менник приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные и опытно-расчетные значения коэффициента теплоотдачи от пара к стенке трубки при различном расходе воды

Расход воды, кг/с	Коэффициент теплоотдачи от греющей среды, Вт/(м ² ·К) (экспериментально)	Коэффициент теплоотдачи от греющей среды, Вт/(м ² ·К) (опытно-расчетные)
0,0023	24,28	26,7
0,016	136,11	130,9
0,036	285,7	287,2

Как видно из таблицы 1, значения коэффициента теплоотдачи отличаются незначительно. Таким образом, предварительные исследования свидетельствуют о надежности полученных экспериментальных данных.

Результаты обработки экспериментальных исследований в графическом виде отображены на рисунках 3, 4. На рисунке 3 видно, что с ростом температуры на поверхности стенки при постоянной температуре перегретого пара коэффициент теплоотдачи от пара к поверхности снижается, что характерно для процесса нагревания в среде водяного пара. Это вызвано ослаблением теплоотдачи за счет конденсации пара и переходом к процессу теплоотдачи только за счет свободной конвекции. При этом полученные значения коэффициента теплоотдачи значительно ниже, чем при конденсации водяного пара. Это объясняется двумя обстоятельствами. При тепловой обработке пищевых продуктов в среде перегретого водяного пара в реальных технологических аппаратах с негерметизированными рабочими камерами присутствует примесь воздуха в количестве не менее 5–6 %, что подтверждается экспериментально. Наличие примеси воздуха в количестве 5–6 % снижает коэффициент теплоотдачи до 15 % от теплоотдачи при конденсации чистого водяного пара [10, с. 152].

Коэффициент теплоотдачи при конденсации пара относится к разности температур между температурой насыщения водяного пара и температурой поверхности $\Delta t = t_n - t_c$. Тогда как в проводимых исследованиях коэффициент теплоотдачи отнесен к разности температур между температурой греющей среды и температурой поверхности $\Delta t = t_n - t_c$ как для свободной конвекции однофазной среды. Эта разность температур во много раз большая. При процессе теплообмена без образования конденсата имеет место теплоотдача от перегретого водяного пара, который близок к идеальным газам. При этом, чем выше температура перегрева водяного пара, тем больше он по своим свойствам приближается к идеальным газам. В исследуемой задаче имеет место теплоотдача при свободной конвекции с процессом конденсации пара или без него. Поэтому относить коэффициент теплоотдачи к разности температур $\Delta t = t_n - t_c$ невозможно.

При проведении исследований наиболее низкая температура наблюдалась в нижней части трубки теплообменника, наиболее высокая – в верхней части. Так, при средней температуре стенки 101,5°C разность температур между верхней и нижней точками измерения составляла 6,5–7°C. Следовательно, в реальном технологическом процессе на верхних участках обрабатываемых изделий обезвоживание внешней оболочки начнет осуществляться раньше, чем на остальной поверхности, что обусловит различную толщину и цвет корки по площади готового изделия. При этом величина теплового потока от греющей среды будет изменяться вдоль поверхности теплообмена. Таким образом, переход от процесса теплоотдачи с конденсацией пара к процессу теплоотдачи только за счет свободной конвекции будет осуществляться при средней температуре поверхности большей, чем температура насыщения.

Результаты исследований свидетельствуют, что такой переход происходит при средней температуре поверхности 104°C. Коэффициент теплоотдачи от перегретого водяного пара при температуре поверхности 104°C составляет 45 Вт/(м²·К) и при дальнейшем повышении становится почти постоянным, что свидетельствует о прекращении конденсационных процессов. При температурах поверхности выше 104°C имеет место теплоотдача при свободной конвекции. При меньших значениях температуры поверхности коэффициент теплоотдачи

возрастает. Это можно объяснить переходом к смешанному процессу теплоотдачи за счет свободной конвекции и частичной конденсации водяного пара. С уменьшением температуры поверхности влияние конденсации усиливается, и коэффициент теплоотдачи растет все круче и должен уйти в высокие значения.

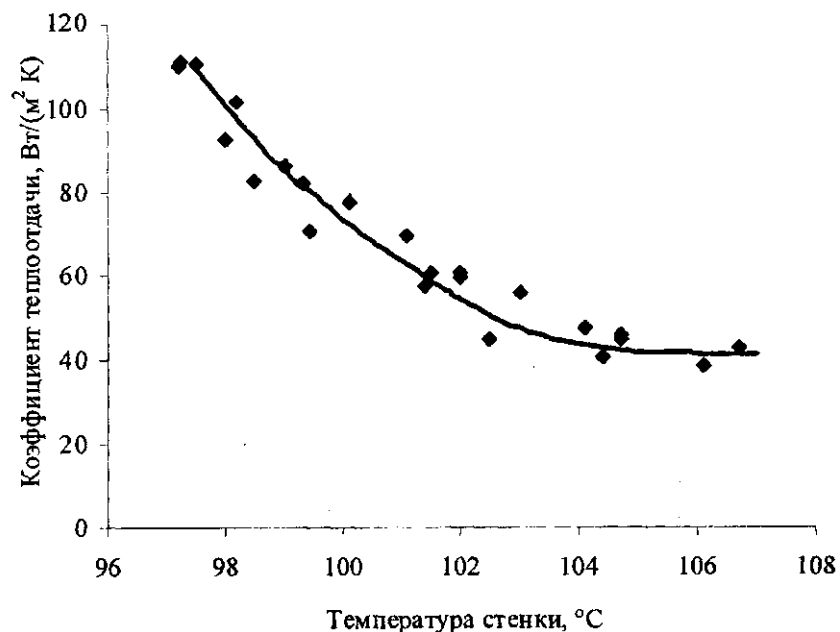


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры на поверхности стенки (температура греющей среды $200 \pm 5^\circ \text{C}$)

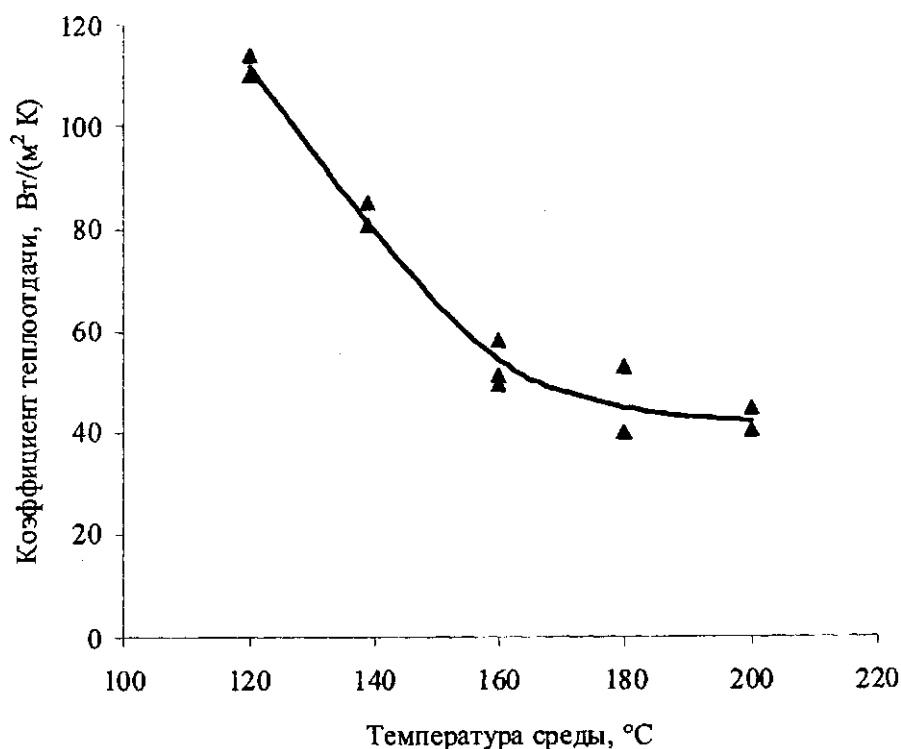


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры греющей среды (средняя температура на поверхности стенки $99-101^\circ \text{C}$)

Полученные данные подтверждаются результатами исследований теплоотдачи к поверхности трубки теплообменника, имеющей постоянную температуру при различных температурах перегретого водяного пара (рисунок 4). При значениях температуры перегретого водяного пара до 180°C снижение теплоотдачи имеет крутой характер, а при более высоких тем-

пературах приобретает пологий, что свидетельствует о переходе от процесса теплоотдачи при наличии конденсации пара на поверхности к процессу теплоотдачи только свободной конвекцией.

Изменение характера снижения кривых на рисунках 3 и 4 происходит при одинаковых значениях коэффициента теплоотдачи. На обоих графиках коэффициент теплоотдачи снижается до почти постоянной величины, равной 40–42 Вт/(м²·К), что дополнительно подтверждает наши предположения и выводы. Следовательно, при температуре поверхности изделий ниже 104°С тепловая обработка интенсифицируется наличием конденсации пара на поверхности. Переход к процессу теплоотдачи свободной конвекцией снижает интенсивность нагревания поверхности изделий. С другой стороны, это приводит к подсушиванию поверхности с дальнейшим образованием корки, что определяет возможность осуществления процессов жарки и запекания. Как видно из рисунка 4, температура перегретого пара при этом должна быть не ниже 180°С.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что тепловая обработка пищевых продуктов в среде перегретого водяного пара интенсифицируется за счет более высокого коэффициента теплоотдачи от греющей среды на начальной стадии. Показано, что на начальной стадии тепловой обработки на поверхности изделий протекает процесс теплоотдачи при наличии конденсации пара сначала на всей поверхности, а затем на части поверхности. В дальнейшем процесс теплоотдачи происходит за счет свободной конвекции при практически постоянном коэффициенте теплоотдачи ниже 45 Вт/(м²·К). Выявлено, что переход от процесса теплоотдачи с конденсацией пара к процессу теплоотдачи только за счет свободной конвекции происходит при средней температуре на поверхности изделий в районе 104°С. При этом снижается интенсивность нагревания поверхности изделий, но возникает возможность осуществления процессов жарки и запекания. Установлено, что для получения готовой продукции с корочкой равномерной толщины и колера температура перегретого водяного пара должна составлять не менее 180°С.

Литература

1. Вазагов, В.М. Разработка и обоснование технологии жаренья крупнокусковых мясных полуфабрикатов на предприятиях общественного питания. Автор. канд. дис. / В.М. Вазагов. – М., 1977. – 24 с.
2. Калашников, Г.В. Совершенствование процесса гидротермической обработки и варки круп с использованием перегретого пара атмосферного давления. Автор. докт. дис. / Г.В. Калашников. – Воронеж, 1991. – 25 с.
3. Кравченко, В.М. Научное обеспечение процессов тепловой обработки пищевого растительного сырья перегретым паром. Автор. докт. дис. / В.М. Кравченко. – Воронеж, 2004. – 40 с.
4. Остриков, А.Н. Развитие научных основ и разработка способов тепловой обработки пищевого растительного сырья с использованием перегретого пара. Автор. канд. дис. / А.Н. Остриков. – Воронеж, 1993. – 35 с.
5. Tang, Z. Dehydration dynamics of potatoes in superheated steam and hot air. / *Canad. Agr. Engg.*, Z. Tang, S. Cenkowski. – 2000. – P. 43–49.
6. Груданов, В.Я. Многофункциональный жарочный шкаф для предприятий общественного питания // *Международный аграрный журнал* / В.Я. Груданов, И.М.Кирик, О.Р. Смирнов. – 1999, № 4. – С. 57–59.
7. Груданов, В.Я. «Золотая» пропорция в инженерных задачах: монография / В.Я. Груданов. – Могилев: МГУ им. А.А. Кулешова, 2006. – 288 с.
8. Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара: справочник. рек. гос. службой стандартных справочных данных. / С.Л. Ривкин, А.А. Александров – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.
9. Аметистов, Е.В. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; под общей редакцией Е.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
10. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

Поступила в редакцию 20.11.2009