

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР**

**КИЕВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

На правах рукописи

Аспирант КУЛИНЧЕНКО ВИТАЛИИ РОМАНОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ
САХАРНЫХ РАСТВОРОВ И УТФЕЛЕЙ
В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ**

**Специальность 05.14.04. Промышленная теплоэнергетика
/Пищевая промышленность/**

АВТОРЕФЕРАТ

**. диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Киев – 1974

Киевский технологический институт пищевой промышленности направляет Ван на отзыв автореферат диссертации В.Р.КУЛИНЧЕНКО "Исследование теплообмена при кипении сахарных растворов и утфелей в условиях естественной конвекции".

Отзыв на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направить в Ученый Совет факультетов механического, теплоэнергетики и автоматизации производственных процессов /252017, г. Киев 17, ул. Владимирская, 68/.

Ученый секретарь Совета,
доцент

В.И.МАРЧЕНКО

Работа выполнена на кафедре промышленной теплоэнергетики Киевского технологического института пищевой промышленности.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
В.Т.ГАРЯЖА

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Г.Н.ДАНИЛОВА

Кандидат технических наук, доцент О.А.ТКАЧЕНКО

Ведущее предприятие - Ордена Трудового Красного Знамени
Институт тепло- и массообмена АН БССР.

Автореферат разослан " ____ " _____ 197 __ г.

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 197 __ г.
на заседании Ученого Совета факультетов механического, теплоэнергетики и автоматизации производственных процессов Киевского технологического института пищевой промышленности /г. Киев-17, ул. Владимирская, 68, ауд. 311/.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

XXIU съездом КПСС намечена грандиозная программа дальнейшего продвижения советского общества по пути к коммунизму, строительства его материально-технической базы, укрепления экономической мощи страны. Большую задачу поставлено перед работниками сахарной промышленности – увеличение за пятилетие производства сахара на 34%, с выработкой к 1975 г. его из свеклы до 10,9 млн т в год.

Выполнение этих планов может быть достигнуто путем ввода в действие новых заводов, реконструкции существующих с заменой морально устаревшего оборудования непрерывнодействующим, на базе которого возможна комплексная автоматизация производственных процессов. Особое внимание уделяется кристаллизации сахара, от которой во многом зависит производительность завода, качество сахара и потери его с отходами, расход пара и равномерность его потребления.

Создание непрерывнодействующих вакуум-аппаратов требует исследования многих вопросов и, в первую очередь, разработки оптимальных тепловых, гидродинамических, технологических режимов в их взаимосвязи. Изучению отдельных вопросов тепло- и массопереноса при кипении утфелей в последние три десятилетия посвятили своя работы Силин П.М., Знаменский Г.М., Попов В.Д., Гулый И.С., Кот Ю.Г., Гаряжа В.Т., Вайсман Н.Л., Тройно В.П., Горох В.Н. и ряд зарубежных авторов.

Выполненные работы не исчерпывают все особенности теплоотдачи к кипящим утфелям, многие из которых еще не раскрыты, как и не вполне изучен механизм парообразования на границе раздела стенка-утфель, в особенности, при давлениях гораздо ниже атмосферного.

Настоящее исследование направлено на дальнейшее изучение механизма кипения в большом объеме при естественной циркуляции утфеля, находящегося под атмосферным и пониженным давлениями, в

условиях близких к стационарным, когда при изменении одного известного параметра остальные оставались неизменными. Цель выполненной работы заключалась также в создании вакуум-аппарата непрерывного действия и методов интенсификации процессов в современных циркуляционных аппаратах.

Исходя из этого диссертационная работа предусматривает следующие задачи:

1. Исследование механизма парообразования при кипении утфелей /высокодисперсной суспензии кристаллов сахара в маточном растворе/. Выявление физической картины процесса и факторов, определяющих его интенсивность.

2. Исследование влияния пространственно-временных и теплофизических параметров пузырька на процесс теплоотдачи к кипящим утфелям.

3. Исследование интенсивности теплоотдачи к кипящим в большом объеме утфелям при пониженных давлениях и обобщение полученных результатов методами теории подобия,

4. Определение путей интенсификации процесса теплоотдачи и рекомендаций по разработке вакуум-аппарата новой конструкции.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа изложена на 155 страницах основного текста, включая 31 рисунок, и состоит из аннотации, введения, 5 глав и выводов.

Во введении рассмотрено значение и состояние вопроса и дано обоснование постановки настоящего исследования.

В первой главе приведен анализ теоретических и экспериментальных работ по механизму парообразования и теплообмену при кипении жидкостей в большом объеме, а также изложены задачи настоящего исследования.

Во второй главе обоснован выбор схемы экспериментальной установки и измерительных приборов. Описана экспериментальная установка, методики измерений и обработки опытных данных и определены погрешностей.

В третьей главе изложены результаты исследования динамики роста паровых пузырьков в высоковязких, грубодисперсных утфелях.

В четвертой главе содержатся результаты обработки и обобщения экспериментальных данных по теплообмену и описана качественная сторона процесса.

В пятой главе рассматривается применение результатов исследования для разработки вакуум-аппарата, внедрение которого дает значительный экономический эффект при уваривании утфелей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ.

В соответствии с намеченными задачами экспериментальная установка изготовлена и оснащена измерительными приборами, позволяющими вести непосредственное измерение всех тепловых характеристик изучаемого процесса.

Установка для исследования динамики роста паровой фазы и коэффициентов теплоотдачи /рис.1/ представляет собой сосуд /1/ со встроенным в него по оси экспериментальным участком /2/. Для обеспечения чистоты экспериментируемых сред все детали установки выполнены из аустенитной стали 1X18H10T и цветных металлов. Для визуальных и кинематографических исследований боковые стенки оборудованы смотровыми стеклами.

Экспериментальная часть установки /1/ имела компенсационный жидкостной подогреватель. Подогрев теплоносителя, полиметилсилоксановой жидкости ПМС-200, осуществлялся в ультратермостате /22/. Экспериментальный участок /2/ состоял из медной трубки \varnothing мм с встроенным в нее электронагревателем. Нагрузка на него подавалась от сети через универсальный источник питания УИП-1 /11/ и контролировалась амперметром и вольтметром М-502 /12,13/.

Температура стенки трубки определялась 12 медь-константановыми термопарами /14/ компенсационным методом с применением потенциометра Р-306 /19/, нуль-термопары /20/, многооточечного переключателя /21/ и гальванометра М-17 /18/.

Пары, образовавшиеся в результате кипения конденсировались в /4/. Необходимое разрежение поддерживалось в установке вакуум-насосом ВН-961М /10/ через ресивер /9/, брызгоулавливатель /8/, регулировалось вентилем /5/ и измерялось ртутным манометром /3/.

Кино съемка камерой СКС-1М /15/ проводилась в проходящем свете от фотолампы /6/, необходимая нагрузка на камеру и отметчик времени регулировалась автотрансформаторами /17/ и контролировать вольтметрами /16/. Визуальные наблюдения проводили, пользуясь подсветкой от лампы /7/.

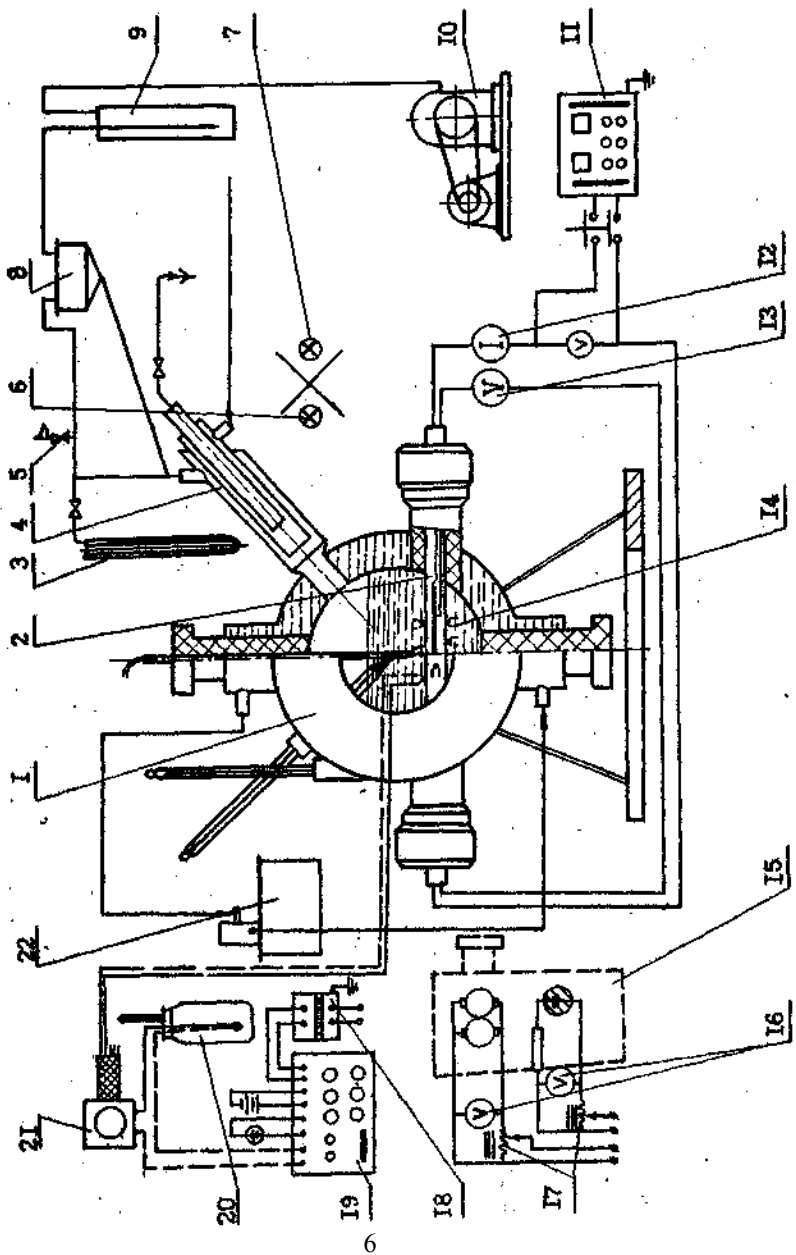


Рис. I Схема экспериментальной установки.

Экспериментальная установка позволяла с погрешностью не более 5% определять коэффициенты теплоотдачи к кипящей воде, сахарным растворам и утфелям. Погрешность в определении отрывного диаметра и скорости роста паровых пузырьков не превышала 1%.

В процессе опытов замерялись: сила тока и напряжение на рабочем участке экспериментальной трубки с последующим определением теплового потока, усредненная температура теплоотдающей поверхности по 12 термопарам, температура в компенсационном жидкостном подогревателе, температурные поля кипящего утфеля. Проводилась киносъемка процесса кипения.

Опыты проводились на чистых высококонцентрированных утфелях с общей массовой концентрацией сухих веществ $СВ_y = 73,6-92,4\%$, массовым содержанием кристаллов $КР = 10-50\%$ и доброкачественностью близкой к 100 ед.Дб. В каждой серии опытов состояние рабочего тела оставалось неизменным, об этом свидетельствовали анализы $СВ_y$, $СВ_m$, Дб, Дб_m, П, КР. Изменялся только тепловой поток.

Правильность принятой методики проверяли на серии экспериментов с бидистиллированной водой. Полученная зависимость $\alpha_2=f(q)$ находилась в полном согласии с известными в литературе данными. Кинематографические исследования позволили статистическим путем определить D_0 , f и D_0f , которые хорошо согласуются с данными Толубинского В.И. в области давлений более 0,2 бар.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

1. Температурные поля в кипящих утфелях

В процессе проведения экспериментов определялись одномерные поля температур начиная от теплоотдающей поверхности по вертикали до зеркала испарения. По температурным полям рассчитывались и строились поля плотностей, вязкости, теплопроводности, пересыщений с целью выбора оптимального температурного режима для процесса теплоотдачи к кипящим в большом объеме утфелям.

Анализ кривых распределения температур показал, что падение усредненной температуры по высоте от теплоотдающей поверхности к зеркалу испарения происходит в основном внутри пристенного слоя. С увеличением массового содержания кристаллов сахара в утфеле, то есть с увеличением эффективной вязкости, увеличивается и

пристенный слой, в котором утфель перегрет по сравнению с температурой кипения /так при $p = 0,131$ бар, $KP=50\%$, $q = 80$ квт/м² перегрев достигает $\sim 70^\circ\text{C}/$, соответствующей температуре насыщения с учетом физико-химической депрессии. Толщина пристенного перегретого слоя для высококонцентрированных утфелей, указанных выше, достигает 50 мм при $q = 10$ квт/м² и уменьшается до ~ 25 ш при $q = 80$ квт/м². Однако профиль температур в этом слое имеет два участка: прямолинейный, где происходит падение температур более чем на 80%, и последующий криволинейный. Используя методику, предложенную Маркусом и Дропкиным, определяли "экстраполированную толщину перегретого слоя", которая получена как бы продлением линейной части профиля до пересечения с линией постоянной температуры основной массы утфеля.

Для кипящих утфелей "экстраполированная толщина перегретого слоя" – δ является функцией двух переменных q и CB_y , которые заключают в себе теплофизические и режимные параметры по различному влияющие на δ . С увеличением q при $CB = \text{const}$ δ будет уменьшаться, а при $q = \text{const}$ и увеличивающемся содержании CB – δ увеличивается. Однако $\delta = f(q)$ и $\delta = f(CB_{yt})$ представляют собой эквидистантные прямые, что позволяет определить эмпирически δ .

$$\delta = 0,377CB_y - 0,2q - 7,8, \quad (1)$$

где δ , мм; CB_y – массовое содержание в процентах; q , квт/м².

Уравнение (1) позволяет определять δ для утфелей высокой доброкачественности с содержанием $KP < 50\%$, $q < 80$ квт/м².

Обработка опытных данных в безразмерной форме температур в зависимости от безразмерного линейного размера /рис.2/ позволила получить уравнение для линейной чаоти температурного профиля H/δ менее 0,9

$$\frac{T - T_n}{T_{ст} - T_n} = 1 - \frac{H}{d}, \quad 0 < \frac{H}{d} \leq 0,9, \quad (2)$$

где T – осредненная во времени температура на расстоянии H от теплоотдающей поверхности. За участком с линейным распределением температуры следует область, где безразмерная разность температур выражается зависимостью /рис.3/ безразмерной функции H/δ ,

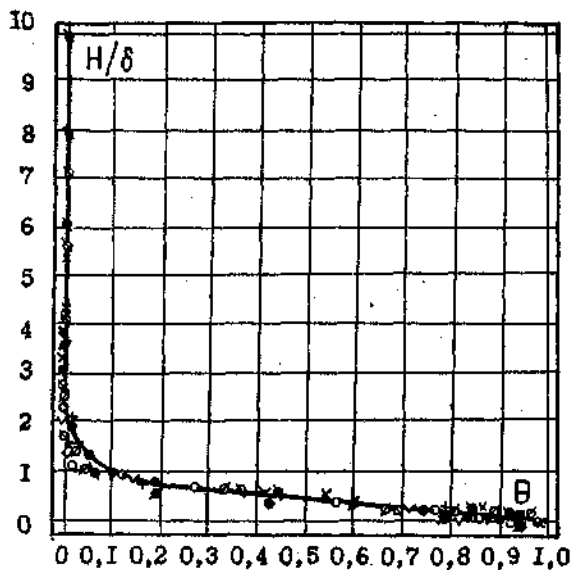


Рис.2 Распределение температур в кипящем углу в безразмерной форме.

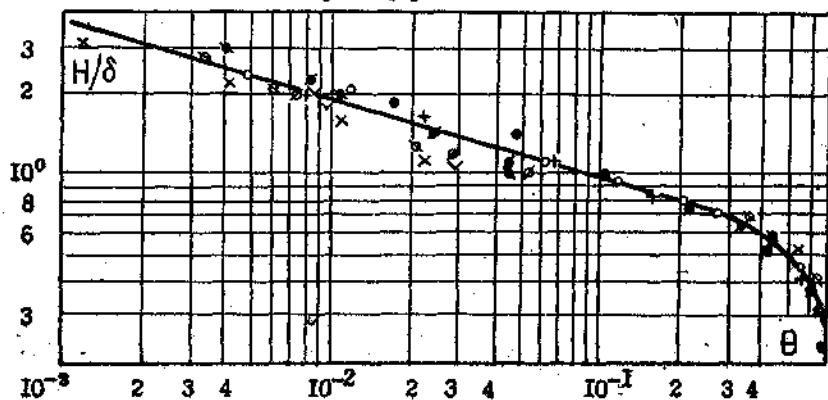


Рис.3. Распределение температур в нелинейной области в кипящих углах в безразмерной форме.

($CV_y=76,4$ ● -10 ■ -40 ▲ -80 кВт/м²
 $CV_y=81,7$ ○ -10 ◊ -40 ◑ -80 кВт/м²
 $CV_y=87,0$ + -10 √ -40 × -80 кВт/м²)

$$\frac{T - T_n}{T_{ст} - T_n} = 0,078 \left(\frac{H}{d} \right)^{-3,2}, \quad \frac{H}{d} > 0,9. \quad (3)$$

Градиенты температур над теплоотдающей поверхностью приводят к градиентным явлениям теплофизических свойств утфелей. Для таких величин, как ρ_y и λ_y , эти явления не существенны, так как общий диапазон изменения величин при проведении опытов составляет 1320-1468 кг/м³ и 0,326-0,379 Вт/м·град соответственно. На коэффициенте кинематической вязкости изменение температуры в пристенном слое сказывается значительно, так при $p = 0,131$ бар, $KP = 50\%$, $q = 40$ кВт/м² v изменяется от $13 \cdot 10^{-6}$ до $152 \cdot 10^{-6}$ м²/сек то есть более чем на 1100%. Распределение концентрации СВ_y и связанного с ним пересыщения показывает, что в пристенном слое утфель находится в ненасыщенном состоянии в то время, как за его пределами в стабильном или метастабильном состоянии. Снижение пересыщения по мере приближения к теплоотдающей поверхности позволяет заключить, что в пристенном слое процесс кристаллизации невозможен из-за перегрева и связанного с ним плавления кристаллов сахара.

Результаты выполненного исследования легли в основу создания новой модели вакуум-аппарата непрерывного действия с подкачкой свежего раствора под слой утфеля.

2. Динамика роста паровых пузырьков в грубодисперсных сахарных утфелях

С помощью скоростной киносъемки были определены внутренние характеристики процесса кипения при пониженных давлениях. Учитывая статистический характер пузырькового кипения для получения надежных данных, по динамике роста было изучено около 4000 пузырьков. В среднем для каждого утфеля проведено 150 наблюдений. В результате получены для утфелей с различным содержанием твердой фазы при давлениях 0,062-0,684 бар значения отрывных диаметров, частоты отрыва и средней скорости роста паровых пузырьков. Установлено, что распределение вероятностей величин $D_o f$, и $D_o f$ близки к закону нормального распределения. Это позволило с незначительной погрешностью /менее 5%/ упростить обработку результатов, так как наиболее вероятные значения исследуемых величин близки к среднеарифметическим.

Например, для утфеля с содержанием КР = 10%, $p = 0,417$ бар, $q = 30$ квт/к², $\Delta T = 25,9^\circ\text{C}$ из гистограммы вероятностей распределения $D_o = 7,3$ мм; определенное как среднеарифметическая величина $D_o = 7,48$ мм; путем планиметрирования площади пузырька с последующим определением диаметра эквивалентного круга $D_o = 7,4$ мм.

Дешифровка кинолент показала, что механизм парообразования при давлениях до 0,2 бар отличен от такового при более низких давлениях. Это отличие заключается в том, что для $p < 0,2$ бар значительно увеличивается время ожидания и общее время цикла, уменьшается скорость генерации паровой фазы D_{of} и увеличивается скорость роста паровых пузырьков dr/dt .

Рассмотрим механизм роста паровых пузырьков на теплоотдающей поверхности при давлениях более 0,2 бар. Анализ температурных кривых и кинолент позволил принять модель роста индивидуального парового пузырька, соответствующую предложенной Лабунцовым Д.А. Однако, из-за большой толщины пристенного перегретого слоя паровой пузырек за весь период роста находится в этом слое, а в случае выхода за него /большие тепловые потоки/ верхняя часть пузырька будет перемещать перегретый утфель, Таким образом граница раздела фаз утфель-пар будет все время находиться в перегретом утфеле.

Запишем общее уравнение теплового баланса для растущего пузырька:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4. \quad (4)$$

Здесь $Q_1 = 2pRl\Delta T \cos \frac{\alpha}{2} \ln \frac{D}{y_A}$ – количество тепла подводимое к

элементам основания пузырька; $Q_2 = \sqrt{\frac{3p}{a\phi}} R^2 l \Delta T \sin^2 \alpha$ и – количество тепла подводимое к остальной части пузырька перегретым утфелем;

$Q_3 = rc'' R^2 \frac{dR}{d\phi} (1 + \cos \alpha)^2 (2 - \cos \alpha)$ – количество тепла воспринятое

паровым пузырьком; $Q_4 = \alpha_{\text{кр}} \frac{p c' l \Delta T dR / d\phi}{g} (1 + \cos \alpha) R^2$ –

количество тепла отданного границей фазового раздела массе утфеля.

Подставляя значения величин, входящих в уравнение /4/ в введя обозначения:

$$\alpha = \frac{\frac{J_{\text{пр}}}{g(1 + \cos \theta)}(2 - \cos \theta)}, \text{ и } 60 - 90 \text{ } \alpha = 0,002275 - 0,0128;$$

$$\beta = \frac{2 \cos \theta / 2 \ln d / y_A}{(1 + \cos \theta)^2 (2 - \cos \theta)}, \text{ и } 60 - 90 \text{ } \beta = 7,07 - 11,3;$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{3}{\rho}} = \frac{\sin^2 \theta}{(1 + \cos \theta)^2 (2 - \cos \theta)}, \text{ и } 60 - 90 \text{ } \gamma = 0,22 - 0,49$$

после преобразования получим

$$\frac{dR}{d\phi} - \beta \frac{1}{R} \frac{Ja Pr a}{Pr + \alpha Ja} - \gamma \Phi^{0,5} \frac{Ja Pr \sqrt{a}}{Pr + \alpha Ja} = 0.$$

Решение уравнения в виде

$$R = k \sqrt{\phi} + C \text{ при } \phi = 0, R = 0, C = 0 \quad (5)$$

приводит к окончательной зависимости, описывающей динамику роста парового пузырька в грубодисперсном сахарном угле

$$R = \sqrt{a \phi \gamma} \left[\frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{1}{Ja} + \frac{\alpha}{Pr} \right) \chi}}{\frac{1}{Ja} + \frac{\alpha}{Pr}} \right] \sqrt{a \phi \gamma} \Xi, \quad (6)$$

где $\chi = 2\beta/\gamma^2$.

Наилучшее согласование теоретической кривой с опытными данными достигается при следующих значениях геометрических факторов $\gamma = 0,35$; $\beta = 8,0$; $\phi = 0,0025$ /рис.4/.

Зависимость /6/ с увеличением значений чисел подобия приближается к выражению

$$R = 2 \sqrt{a \phi \gamma} Ja,$$

которое с точностью до цифровых коэффициентов совпадает с уравнением Лабунцова Д.А.

Сопоставление опытных данных с теоретической кривой /рис.4/ свидетельствует о правомерности принятой модели подвода тепла в

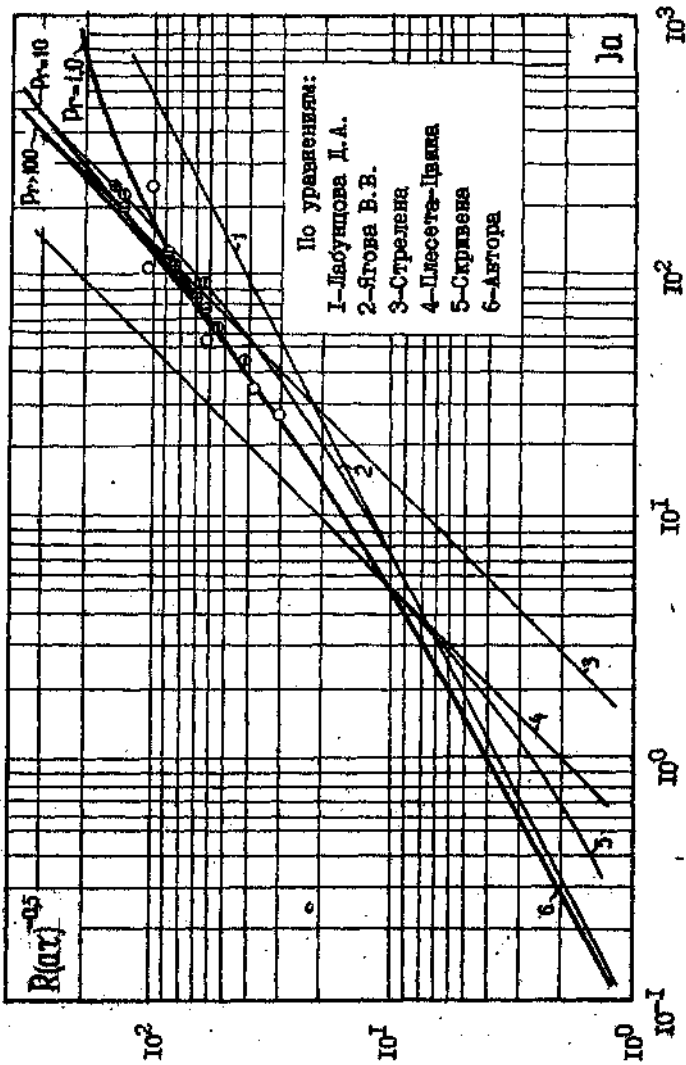


Рис.4 Сравнение теоретических и экспериментальных данных в безразмерной форме при
 липели: o - жом, x - сахарного раствора СВ=80%, o - уфеля КР=10%, x - уфеля КР=30%.

растущий пузырек пара, и находится в определенном согласовании с соотношениями Лабунцова Д.А., Ягова В.В., Стрелена, Плесега-Цвика, Скривена.

3. Отрывные размеры пузырьков и частота генерации паровой фазы

Для возможности прогнозирования процесса теплоотдачи при кипении высоковязких сахарных растворов и угфелей кроме динамики роста паровых пузырьков необходимо знать их отрывные размеры, частоту генерации и скорость роста паровой фазы.

Аналитическое решение задачи определения отрывного радиуса пузырька будем искать в виде

$$R_o = \frac{1}{3n + 1} g \Phi_p^2,$$

где $n \approx 0,5$, при этом

$$R_o = 0,4 g \Phi_p^2. \quad (7)$$

Определяем τ_p из уравнения /6/ и подставляя его значение в /7/ получим

$$R_o = 1,35 \left(\frac{a^2}{g} \right)^{1/3} (\Gamma \Xi)^{4/3}. \quad (8)$$

Область применения этого уравнения, как и всех нижеследующих, распространяется на ту часть давлений, где можно пренебрегать действием гидродинамических лобовых сопротивлений на скорость роста парового пузырька и где еще действует инерционная схема отрыва, и охватывает следующие значения чисел подобия $Ja < 1000$, $Pr < 1000$.

Определить значение τ_p можно путем совместного решения уравнения /6/ и /7/, в результате чего

$$\Phi_p = 1,84 \left(\frac{a^2}{g} \right)^{1/3} (\Gamma \Xi)^{2/3}. \quad (9)$$

Время ожидания τ_o вызвано притоком "холодной" жидкости в освобожденную область, образованную оторвавшимся пузырьком, перегревом ее до температуры, соответствующей возникновению жизнеспособного парового зародыша. С понижением давления τ_o увеличивается и составляет 50-75% от τ_p при $p \approx 1$ бар для воды, сахарного раствора с содержанием СВ = 80% и 65% для угфелей при $p = 0,684$ бар; соответственно эти величины при $p = 0,06$ бар составляют 450,

630, 640%. Следовательно при давлениях $p > 10$ бар для воды и $p > 1$ бар для криогенных и фреонов $\tau_o \ll \tau_p$ и его численным значением можно пренебречь, тогда

$$\bar{f} = 0,545 \left(a \Gamma^2 \right)^{-1/3} \Xi^{2/3}. \quad (10)$$

При $p < 1$ бар, где $\tau_o > \tau_p$ необходимо для определения частоты отрыва иметь сведения о τ_o , аналитически определить значение времени роста не представляется возможным. Однако, частота генерации паровых пузырьков находится в определенной связи с отрывным диаметром рис.5, которая в первом приближении описывается уравнением:

$$f = 1,04 D_o^{-0,7}. \quad (11)$$

Эмпирическое соотношение /11/ получено на основании обработки опытных данных Толубинского В.И. для сред, указанных на рис.5 и полученных данных для воды, сахарного раствора СВ=80% и утфелей с массовым содержанием кристаллов КР=10–30%.

При совместном рассмотрении уравнений /9/ и /11/ можно оценить время ожидания.

Численные значения $D_o f$ для любых значений режимных параметров и теплофизических свойств сахарных растворов и утфелей можно получить путем совместного решения аналитико-эмпирических уравнений /8/ и /11/, откуда при $g = 9,81$

$$D_o f = 1,125 a^{0,2} (\Gamma \Xi)^{0,4}. \quad (12)$$

Представление о механизме роста и отрыва паровых пузырьков при кипении воды, сахарных растворов и утфелей, а также вытекающие из них соотношения для отрывных размеров, времени роста и частоты генерации паровой фазы получили подтверждение при сопоставлении с экспериментальными данными Лабунцова Д.А., Толубинского В.И., Даниловой Г.И., Ягова В.В.

4. Интенсивность теплообмена при свободной конвекции

Подогреву утфелей до температуры кипения соответствует конвективный перенос тепла между теплоотдающей поверхностью и омывающем ее утфелей. Интенсивность этого процесса определяется размерами теплоотдающей поверхности, а также гидродинамическим и теплофизическим состоянием утфеля. Коэффициенты теплоотдачи относительно невелики и поэтому устанавливаются большие температурные перепады между греющей стенкой и средой.

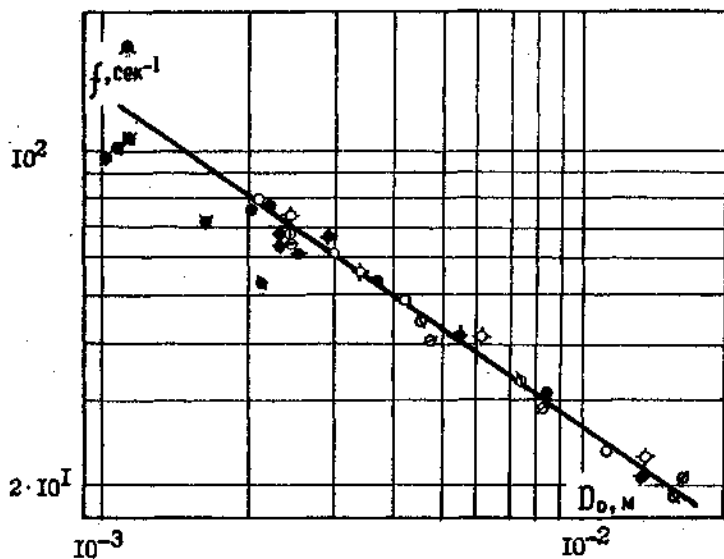


Рис. 5. Связь между частотой и отрывным диаметром парового пузыря.

(● - СВ=70-72%, ◆ - вода, ⊖ - 25% NaCl, ⊕ - 29% Na₂CO₃, по данным Толубинского В.И., Островского Ю.Н. в сб. "Конвективный теплообмен", "Наукова думка", К., 1965, стр. 15.
 ◆ - вода, ▲ - 96% C₂H₅OH, ♣ - CH₃OH, ◀ - n-бутыловый спирт, ■ - CCl₄, ♣ - 94% глицерин, ♣ - бензол, по данным Толубинского В.И., Костанчука Д.М., Кривенко А.А., Островского Ю.Н. в сб. "Теплофизика и теплотехника", "Наукова думка", №23, 1973, К., стр. 5.

⊕ - вода, ○ - сахарный раствор СВ=80%, ♣ - утфель КР=10%, ♣ - утфель КР=30%, по данным автора).

Так, при $p = 0,0605$ бар и $q,2$ квт/м² – $\Delta t = 9,2^\circ\text{C}$ теплообмен осуществляется при этом только конвекцией и это продолжается до тех пор, пока полезная разность температур не увеличивается до $13,5^\circ\text{C}$.

Физические свойства утфелей в прилегающем к стенке слое заметно изменяются, в силу этого α_2 не могут быть определены без учета этих изменений. Наиболее сильно у них изменяется вязкость. Учесть это изменение можно при помощи отношения $P_{гж}/P_{гст}$ предложенного Михеевым М.А.

Проведенное обобщение опытных данных в форме $Nu = f(Pa, P_{гж}/P_{гст})$ /определяющая температура $t_{cr} = 0,5 (t_0 + t_H)$ линейный размер – диаметр теплоотдающей поверхности/ дало значительное расслоение опытных точек в зависимости от содержания кристаллического сахара в утфеле. Расслоение аппроксимирующих линий, по нашему мнению, можно объяснить увеличением молекулярной теплопроводности, с увеличением количества твердой, фазы в дисперсной среде и ухудшением теплопроводности за счет свободной конвекции.

Удовлетворительное обобщение опытных данных достигается при вводе в систему чисел подобия добавочного симплекса

$$K_{cr} = \left[\frac{(\text{ЛН})_y}{(\text{ЛН})_m} \right]_{cr}$$

При этом разброс точек от аппроксимирующей прямой, описываемой уравнением

$$Nu_{cr} = 8,9 \cdot 10^{-2} Ra_{cr}^{0,53} K_{cr}^{0,65} \left(\frac{P_{гж}}{P_{гст}} \right)^{0,25} \quad (13)$$

не превышает $\pm 5\%$.

Визуальное изучение конвективного теплообмена выявило только ламинарное движение среды вокруг теплоотдающей поверхности, хотя число Рэлея изменялось в интервале $(0,915-11,6)10^2$. Это можно объяснить отсутствием в ходе опытов внешних возмущающих факторов, а также тем, что утфель относится к очень вязким суспензиям с приведенным числом Прандтля, изменяющимся от 705 до 3910 для $P_{гст}$ и 1270 до 7020 для $P_{гж}$.

По мере увеличения теплового потока, когда начинается неразвитое пузырьковое кипение, в момент, предшествующий образованию пузырька, конвективные токи преобретали локонообразную форму течения и в момент образования пузырька, его

роста и отрыва переходили в турбулентную форму тока.

Наличие кристаллов сахара отражалось на качественной стороне процесса конвективного теплопереноса. Конвективные токи, встречая на пути кристаллы, обтекали их. Это вело к уменьшению распространения тока в определенном направлении. Этим, с одной стороны, можно объяснить значительное увеличение перегрева в пристенном слое для утфелей. С другой стороны, это же явление вызывается значительной вязкостью межкристалльного раствора, которая тормозит скорость распространения конвективных токов. Таким образом, суммарный эффект от совместного действия кристаллов сахара и вязкости межкристалльного раствора объясняет наличие значительного перегрева в пристенном слое для утфелей.

Качественными особенностями процесса конвективного теплопереноса можно объяснить конструктивное отличие уравнения /13/ от таковых для других исследованных сред.

Когда свободная конвекция не обеспечивает необходимую теплоотдачу от греющей поверхности (при увеличении q), начинается переходное или неразвитое пузырьковое кипение.

5. Теплоотдача при неустойчивом пузырьковом кипении

При неустойчивом пузырьковом кипении на поверхности нагрева возникают отдельные паровые пузырьки. При этом температура жидкости в пристенном слое и на теплоотдающей поверхности в области образования пузырька падает. Затем весь цикл повышения температуры, зарождения, роста и отрыва пузырька с сопровождающимся понижением температуры повторяется. При этом естественная конвекция все еще является главной составляющей теплопереноса при низкой интенсивности кипения.

В утфелях при давлениях более 0,2 бар действуют определенные центры парообразования. Паровые пузырьки всплывают друг за другом при значительных периодах ожидания. Размеры их больше чем для воды и сахарных растворов. Это особенно четко наблюдалось на метастабильных утфелях с содержанием твердой фазы $KP = 10-30\%$ (массовых) и $\Pi = 1,1$. Увеличение теплового потока не приводит к возникновению паровых "столбиков".

При давлениях менее 0,2 бар начинается крайне нерегулярное образование отдельных пузырьков, которые возникают на различных

местах теплоотдающей поверхности без явно выраженных центров парообразования. При этом наблюдалась значительная пульсация температуры стенки /для метастабильных утфелей 5-8 °С/. Появление, рост и отрыв паровых пузырьков в этих условиях сопровождается всплесками утфеля и даже частичным выбросом в конденсатор. Отрывные диаметры пузырьков определить затруднительно, так как иногда ва 1–2 минуты возникало 2–4 пузырька. В связи с нерегулярностью процесса можно было наблюдать появление пузырьков внутри объема утфеля, так как последний при этом был значительно перегрет.

Наличие режима неустойчивого кипения составляет, по нашему мнению, главное своеобразие при кипении утфелей.

Изложенное позволяет представить качественную сторону механизма теплопереноса при неразвитом пузырьковом кипении и, несмотря на известную идеализацию, удовлетворительно отразить истинную картину. Наличие переходной зоны в зависимостях $\alpha_2 = f(q)$ позволяет считать, что значение теплового потока, соответствующее концу этого режима, является средним q , начиная с которого возможно развитое пузырьковое кипение в данных условиях. При этом каждому давлению соответствует тепловой поток, при котором имеет место начало развитого пузырькового кипения утфелей с различным содержанием твердой фазы. Зависимость $q = f(p)$ при массовом содержании твердой фазы 10, 30, 50 % служит характеристикой, при которой может иметь место развитое кипение при определенном p и $СВ_{ут}$ и показывает, что с увеличением эффективной вязкости увеличиваются тепловые нагрузки начала развитого пузырькового кипения. Так при $p = 0,124$ бар для метастабильных утфелей с содержанием твердой фазы $KP = 10, 30, 50$ % начало развитого пузырькового кипения наступало при $q \approx 4800, 5800$ и 6900 Вт/м² соответственно.

Рассматриваемый режим неустойчивого кипения охватывает значительную область тепловых нагрузок, особенно в области низких давлений. Однако практическое использование этого режима, в силу ранее отмеченных особенностей, представляется крайне нежелательным. Поэтому, на наш взгляд, нет смысла давать какие-либо расчетные зависимости для теплообмена при неустойчивом пузырьковом кипении, так как на практике в существующих и вновь создаваемых вакуум-аппаратах режим этот необходимо избегать.

6. Интенсивность теплообмена при развитии пузырьковой кипении

При проведении экспериментов особое внимание уделялось исследованию теплообмена при пониженных давлениях, так как этой зоне соответствует работа вакуум-испарителей. В связи с этим теплообмен при развитии пузырьковой кипении изучался при давлениях 0,052–0,684 бар для стабильных утфелей и при 0,0605–0,671 – для метастабильных. Тепловые нагрузки достигали 100 кВт/м².

Результаты исследования показали, что коэффициент теплоотдачи пропорционален тепловой нагрузке в степени, изменяющейся от 0,3 до 0,59, и зависящий от содержания СВ_у. Об этом свидетельствует функциональная зависимость $n = f(\text{СВ}_у)$, которая в свое время была предложена Горяжей В.Т. и отличается от нашей меньшими значениями абсолютных величин n /опыты проведены на утфелях с низкой доброкачественностью 68–78 ед. Дб/. Изменение n в таком диапазоне можно объяснить значительным изменением коэффициентов кинематической вязкости в ходе экспериментов, который достигал $773 \cdot 10^{-6}$ м²/сек для метастабильных утфелей с КР = 50 % при $p = 0,0605$ бар.

Для выявления степени влияния вязкости на коэффициент теплоотдачи и тем самым ориентировочно на показатель степени при числах подобия, содержащих этот параметр, проведен анализ изменения α_2 в зависимости от кинематической вязкости при постоянном давлении. Если за определяющую температуру принимать $T = T_{\text{св}}$, $q = \text{var}$, то степень влияния ν на α_2 изменяется в широком диапазоне от –0,06 до –4,8 для утфелей с П=1,0–1,1 при $p = 0,0605$ –0,684 бар, в то время как при $T=T_n$, $q = \text{var}$ угловой коэффициент зависимости $\alpha_2 = f(\nu)$ изменяется от –0,2 до –0,38. Следует отметить, что зависимость $\alpha_2 = f(\nu)$ не вполне корректна, так как наряду с изменением ν изменяются и другие теплофизические свойства, которые ведут к изменению внутренних характеристик процесса кипения.

Однако, более корректная критериальная зависимость будет в том случае, когда более стабильны степени при отдельных теплофизических постоянных, которые являются функцией критерия Нуссельта. Поэтому целесообразно обобщение вести по теплофизическим свойствам утфелей, соответствующим температуре насыщения. Выбор этой температуры оправдан еще тем, что

в настоящее время многие авторы за определяющую принимают такую температуру, которая либо задается для инженерных расчетов, либо легко может быть определена.

В свое время были предложены различные критериальные уравнения, которые являются частным случаем наиболее полной системы, полученной Кутателадзе С.С. на основании описания процесса конвективного теплопереноса дифференциальными уравнениями в жидкой и паровой фазе и дополнены условиями на границе раздела фаз.

Остановимся на системе критериев, предложенной Кичигиным М.А.-Тобилевичем Н.Ю., так как она наиболее соответствует рабочим средам настоящего исследования. Критериальную зависимость будем искать не для всей гаммы ранее исследуемых сред и охваченных данными исследованием, а только для утфелей. По нашему мнению такое обобщение более точно будет отражать специфику свойств утфеля, рабочего процесса и пределов изменения параметров.

Обработка опытных данных /более 960 опытов с утфелями/ /рис.6/ дала значительное расхождение с уравнением Кичягина Н.А.-Тобилевича Н.Ю.

$$Nu = 1,04 \cdot 10^{-4} (Pe_u Kp)^{0,7} Ga^{0,125} \quad (14)$$

более чем на 60%. Такое расхождение мы объясняем тем, что уравнение /14/ получено для жидкостей и растворов, а не для высокодисперсных суспензий с определенными эффективными теплофизическими величинами, входящими в критерии подобия. Также при получении уравнения /14/ степень влияния теплового потока на коэффициент теплоотдачи была близка к 0,7 /критерий Пекле в степени 0,7/, в наших опытах $n = 0,3-0,59$. Это безусловно должно вызвать уменьшение показателя степени при Pe_u . Совместное влияние этих двух факторов привело к изменению постоянной уравнений

$$10^5 > p > 0,2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2 \quad Nu = 1,52 \cdot 10^{-3} Ga^{0,125} Kp^{0,7} Pe_u^{0,47}; \quad (15)$$

$$p \leq 20 \text{ н/м}^2 \quad Nu = 6,35 \cdot 10^{-4} Ga^{0,125} K^{0,7} Pe_p^{0,6}. \quad (16)$$

Представленные уравнения описывают аппроксимирующие линии, которые имеют точку перегиба, соответствующую $\sim 0,2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$. Перегиб линий можно объяснить изменением в механизме процесса парообразования и степенью при тепловом потоке. Так при $p_n > 0,2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ $n = 0,3-0,56$, а при $p_n < 0,2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ $n = 0,46-0,59$. Для области $p < 0,2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ n изменяется незначительно, а из анализа

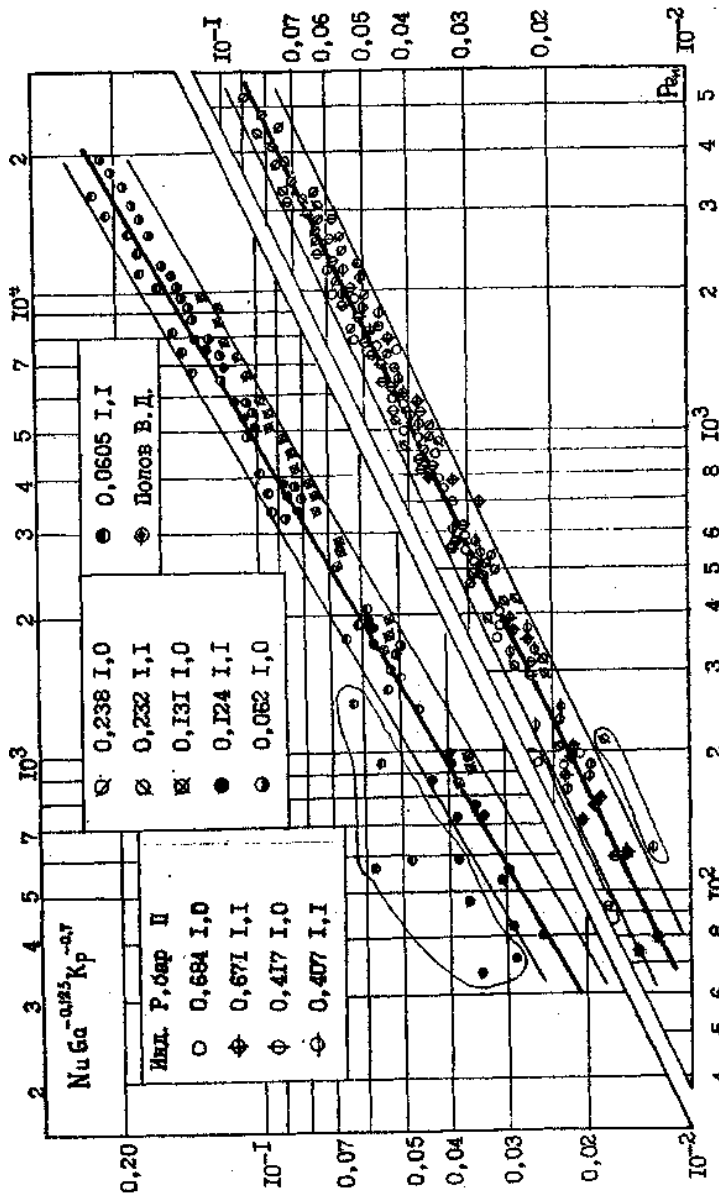


Рис.6 Обобщенные опытные данные по изменению углей с содержанием кристаллов 10-50%.

рис.6 можно заметить расслоение точек по давлениям. Учитывая эти два фактора, получено более точное обобщение опытных данных, описываемое уравнением

$$p \leq 0,2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2 \text{ Nu } 28,6 \cdot 10^{-4} \text{ Re}_{\text{и}}^{0,55} \text{ Kp}^{0,5} \text{ Ga}^{0,125}. \quad (17)$$

Из рис.6 отчетливо видно, что точки, соответствующие режиму неразвитого пузырькового кипения, значительно отклоняются от аппроксимирующих линий и не описываются уравнениями /15–17/. Это дает возможность однозначно определить, коэффициент теплоотдачи, соответствующий режиму только развитого пузырькового кипения, знание которого необходимо при инженерных расчетах вакуум-аппаратов, приближающихся по конструктивным особенностям к условиям настоящего исследования.

7. Практическое применение результатов исследования

В результате проведенного исследования предложен вакуум-аппарат непрерывного действия. Аппарат выполнен, в виде вертикальной емкости, внутри которой установлены наклонные лотки, сообщенные между собой перепускными каналами для утфеля и имеющие под днищем, являющимся поверхностью нагрева, камеру для подвода теплоносителя. С целью улучшения качества кристаллов в утфеле и интенсификации процесса, днище каждого лотка состоит из ряда изогнутых секций, с увеличивающимся углом по ходу движения утфеля. В начале каждой секции, возле перепускных каналов, установлены короба с патрубками для подвода подкачиваемого раствора, имеющие по всей ширине лотка в боковой стенке щель для подачи и распределения раствора под слой утфеля.

Рассмотренный нами один из методов интенсификации процесса тепло- и массообмена в новой конструкции вакуум-аппарата непрерывного действия показывает, что за счет снижения термического разложения сахарозы и за счет снижения расхода топлива достигается значительный экономический эффект, составляющий 35000 рублей. Для одного сахарного завода производительностью 3000 тонн переработанной свеклы в сутки на первый год после внедрения.

ВЫВОДЫ

1 Экспериментальное исследование теплообмена охватывало диапазон давлений от 1 до 0,052 бар / по сравнению с известными в литературе исследованиями диапазон расширен в сторону больших разрежений/ и позволило впервые получить данные об интенсивности теплообмена при свободной конвекции, неразвитом и развитом пузырьковом кипении.

2. Измерены температурные поля в кипящем утфеле, позволившие получить кривые распределения температур, теплопроводности, плотности, вязкости и пересыщения по высоте, начиная от теплоотдающей поверхности до зеркала испарения. Установлен значительный перегрев утфеля в пристенном слое, увеличивающийся с повышением массового содержания кристаллов сахара. Наличие перегрева указывает на необходимость сокращения времени цикла варки или на использование теплоносителей с более низкими температурными потенциалами с целью уменьшения потерь сахара от термического разложения.

3. В результате кинематографического исследования предложена модель роста парового пузырька, на основании которой теоретически получено расчетное соотношение, позволяющее определить скорость роста парового пузырька в высоковязких дисперсных средах, которое согласуется с опытными данными Лабунцова Д.А., Ягова В.В., Микиса Б.Б., Росенау В.М., Гриффитса П.

4. Получено аналитическое решение, позволяющее определить отрывные размеры парового пузырька, время его роста и совместно с эмпирической зависимостью, определяющей частоту генерации паровой фазы, получить паропроизводительность центра парообразования. Аналитическая, эмпирическая и аналитико-эмпирическая зависимости с достаточной достоверностью согласуются с опытными данными Лабунцова Д.А. и Толубинского В.И.

5 Для области конвективного теплообмена получено уравнение, позволяющее определять интенсивность теплоотдачи к утфелям, находящимся в состоянии насыщения.

6. В результате выполненного качественного анализа режима неустойчивого кипения обнаружены: значительные пульсации температуры поверхности нагрева; высокие скорости роста и большие размеры паровых пузырьков при длительных паузах в процессе генерации; сильные всплески утфеля при взрываобразном вскипании.

Получены значения тепловых потоков, позволяющие определить начало развитого пузырькового кипения.

7. Приведены графические зависимости коэффициента теплоотдачи от: теплового потока, давления, массового содержания сухих веществ в утфеле, коэффициента кинематической вязкости. Эти зависимости позволяют судить о влиянии режимных параметров и теплофизических свойств утфелей на коэффициент теплоотдачи.

8. В результате обобщения экспериментальных данных получены уравнения, которые могут применяться для определения интенсивности теплоотдачи при проектно-конструкторских разработках вакуум-аппаратов.

9. Предложена конструкция непрерывнодействующего секционного вакуум-аппарата, позволяющая интенсифицировать тепло- и массообмен. Интенсификация происходит за счет ведения процесса в тонком слое стекающего с одинаковой скоростью утфеля, что достигается увеличением угла наклона теплоотдающей желобчатой поверхности и вводом свежего раствора /подкачки/ под слой, утфеля.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Дб, КР, П, СВ – доброкачественность, массовое содержание кристаллов, пересыщение и содержание сухих веществ, ед.Дб, %КР, ед.П, %СВ;

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{сек}$;

c_p – коэффициент теплоемкости, $\text{кдж}/\text{кг}\cdot\text{град}$;

f – частота образования паровых пузырьков, знак функции, сек^{-1} ;

H – расстояние от теплоотдающей поверхности к месту замера температуры, м;

n – показатель степени;

Q – количество тепла, кдж ;

q – интенсивность теплового потока, $\text{квт}/\text{м}^2$;

R, D – радиус, диаметр парового пузырька, м;

r – скрытая теплота парообразования, $\text{кдж}/\text{кг}$;

T, t – температура, град;

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{вт}/\text{м}^2\cdot\text{град}$;

δ – толщина перегретого слоя, м;

θ – краевой угол;

λ – коэффициент теплопроводности, $\text{вт}/\text{м}\cdot\text{град}$;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{сек}$;

ρ – плотность вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$;

τ – время, сек;

индексы:

" – паровая фаза;

' – жидкая фаза;

и – испарение;

о – отрыв, ожидание;

р – рост;

у, ут – утфель;

м – межкристалльный раствор;

ст – стенка;

н – насыщение;

тр – трение;

ж – жидкость;

сг – среднее гидравлическое.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Механизм теплообмена при кипения сахарных растворов - Тезисы XXXVII науч. конф. КТИПП, 1971, К.

2. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Теплообмен при кипении высоковязких растворов в большом объеме в условиях естественной конвекция – Тезисы XXXIII науч. конф. КТИТШ, 1972, К.

3. W.T. Gariaza, J.G. Artiuchjw, W.I. Pawelko, W.R. Kulinczenko – Hydrodyamika I wymiana ciepłf w warniku cukrowniczym – II Miedzynarodowa konferencja chemii cukrownictwa, 1973, 14–15 VI, Lodz.

4. Горяжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Паведко В.И., Кулинченко В.Р. Гидродинамика и теплообмен в вакуум-аппаратах сахарной промышленности – Доклад на II Международной конференции химии и технологии сахара, 1973, Лодзь, Польша.

5. Кулинченко В.Р., Горяжа В.Т. Експериментальне дослідження пароутворення в киплячих цукрових розчинах та утфелях – Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник Харчова промисловість, № 16, 1973.

6. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Исследование механизма теплообмена при кипении воды и сахарных растворов – Республиканский межведомственный сборник "Теплофизика и теплотехника", № 24, 1973.

7. Горяжа В.Т., Артюхов Ю.Г., Кулинченко В.Р., Дидушко Б.Г., Сторчеус Г.А. Вакуум-аппарат непрерывного действия – Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, № 6, 1974. / Авт.свид. № 415020/.

8. Горяжа В.Т., Кулинченко В.Р. Обобщение опытных данных по теплоотдаче при кипении сахарных уфелей в большом объеме – Известия вузов СССР. Пищевая технология, № 2, 1974.

Результаты работы докладывались и обсуждались на кафедре промышленной теплоэнергетики КТИПП, на 37-39 научных конференциях КТИПП 1971-1973 гг., на II Международной конференции химии и технологии сахара, Лодзь, Польша, 1973 г.

СУПРОВІДНА ІНФОРМАЦІЯ ДО ПУБЛІКАЦІЇ

Аспірант Кулинченко В.Р.

Аспирант Кулинченко В.Р.

Graduate student Kulichenko V.R.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ КИПІННІ
ЦУКРОВИХ РОЗЧИНІВ І УТФЕЛІВ
В УМОВАХ ПРИРОДНОЇ КОНВЕКЦІЇ
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ
САХАРНЫХ РАСТВОРОВ И УТФЕЛЕЙ
В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ
RESEARCH OF HEAT EXCHANGE AT BOILING
SACCHARINE SOLUTIONS AND MASSECUTE IN THE
CONDITIONS OF NATURAL CONVECTION**

Специальность 05.14.04. Промышленная теплоэнергетика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. К.: КТИХП, 1974. – 28 с

Специальность 05.14.04. Промышленная теплоэнергетика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. К.: КТИПП, 1974.– 28 с.

Speciality 05.14.04. Industrial heattransfer

Abstract of thesis of dissertation on the competition of graduate degree candidate of engineering sciences. К.: КТИФИ, 1974.– 28 с.

Наведене дослідження спрямоване на подальше вивчення механізму кипіння у великому об'ємі при природній циркуляції утфеля, що знаходиться під атмосферним і зниженим тиском, в умовах близьких до стаціонарних, коли при зміні одного відомого параметра останні залишалися незмінними. Мета виконаної роботи полягала також в створенні вакуум-апарата безперервної дії і методів інтенсифікації процесів в сучасних циркуляційних апаратах.

Ключові слова: кипіння, великий об'єм, утфель

Настоящее исследование направлено на дальнейшее изучение механизма кипения в большом объеме при естественной циркуляции утфеля, находящегося под атмосферным и пониженным давлениями, в условиях близких к стационарным, когда при изменении одного известного параметра остальные оставались неизменными. Цель выполненной работы заключалась также в создании вакуум-аппарата непрерывного действия и методов интенсификации процессов в современных циркуляционных аппаратах.

Ключевые слова: кипение, большой объем, утфель

The real research is directed on the further study of boiling mechanism in a large volume at natural circulation of masecuite, being under atmospheric and lowered pressures, in terms near to stationary, when at the change of one known parameter other remained unchanging. The purpose of the executed work consisted also in creation of vakuu-pan of continuous action and methods of intensification of processes in modern circulation vehicles.

Keywords: boiling, large оюъем, masecuite