

Автор ер.  
В 68  
Одесский технологический институт пищевой промышленности  
имени М.В.Ломоносова

---

На правах рукописи

Волчок Александр Николаевич

Исследование процесса испарения фруктовых и овощных  
соков в аппаратах и машинах консервной промышленности

Специальность 05.18.12 - процессы и аппараты  
пищевых производств

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Одесса - 1981

Диссертационная работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М.В.Ломоносова

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
профессор Мальский А.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Маложик И.Ф.,  
кандидат технических наук,  
доцент Литвинов А.С.

Ведущая организация: Всесоюзный научно-исследовательский проектно-конструкторский институт "Консервпромкомплекс".

Защита состоится "24" дек. 1981 г в 10.15 часов  
на заседании специализированного совета Д 068.35.01 при  
Одесском технологическом институте пищевой промышленности  
им. М.В.Ломоносова, 270039, г.Одесса, ул.Свердлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского  
технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ло-  
моносова.

Автореферат разослан "23" XI 1981 года

статья

1013779

11

А.Ф.Загибалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

## Актуальность работы

Коренное ускорение темпов научно-технического прогресса, как было отмечено на XXVI съезде КПСС, настоятельно диктует создание и внедрение в промышленность принципиально новых технологических процессов, машин, аппаратов и материалов. В пищевой промышленности важную роль играют методы рациональной переработки сельскохозяйственного сырья.

Увеличение производства пищевых продуктов, повышение качества, улучшение питательной ценности и вкусовых достоинств их требует дальнейшего детального изучения многих проблем и в частности тепло- и массопереноса при выработке натуральных плодовых и овощных соков. Актуальность избранной темы обусловлена изучением тепло- и массообмена в аппаратах и машинах при крупнотоннажном производстве фруктовых и овощных соков. Потери тепла и массы в технологических процессах в этом случае наблюдаются как безвозвратные непроизводительные потери, знание которых для современного производства обязательно.

Цель работы заключается в исследовании процесса испарения соков в машинах и аппаратах консервной промышленности и, на основании экспериментальных данных, получении расчетных уравнений для практического применения.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что в ней впервые исследован процесс испарения со свободной поверхности при производстве фруктовых и овощных соков в аппаратах, даны качественная и количественная оценки изучаемых процессов применительно к технологии консервирования.

ОНАХТ 06.07.11  
Исследование процесс



v013779

Переучет 19/84

Практическая ценность заключается в том, что проведенные исследования и полученные на основе данных опытов расчетные уравнения рекомендованы и использованы для практических расчетов машин и аппаратов пищевых производств при разных режимах обтекания поверхности испарения воздухом и в широком интервале температур, применяемых при обработке пищевых продуктов. Полученные уравнения дают возможность рассчитать в существующих технологических линиях производства различных соков расход тепла и массы.

Апробация диссертационной работы. Основные положения и материалы исследования докладывались на научных конференциях ОТИШ: XXXI в 1970 г., XXXII в 1971 г., XXXIII в 1972 г., XXXIV в 1974 г., XXXV в 1975 г., научной конференции "Молодые ученые г.Одессы - сельскохозяйственному производству" в 1974 году.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертационная работа изложена на 182 страницах машинописного текста. Состоит из введения, четырех глав, основных выводов, библиографического указателя, в котором приводятся 122 источника, в том числе 26 иностранных, 63 иллюстраций и трех приложений.

В первой главе приведен обзор исследований тепло- и массообмена теоретического и экспериментального характера, дан критический анализ известных работ.

Во второй главе описывается экспериментальная установка, методика проведения опытов и обработки экспериментальных данных с применением теории подобия.

В третьей главе приводится анализ экспериментальных данных и результаты обработки их согласно теории подобия и при использовании ЭВМ для получения расчетных уравнений.

В четвертой главе дается анализ погрешностей измерения величин и вычисления критериальных зависимостей.

## ВВЕДЕНИЕ

"Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981-1985 годы и на период до 1990 года ставят задачу увеличения производства продукции пищевых отраслей промышленности на 23-26%, развития высокими темпами производства разнообразных высококачественных продуктов детского и диетического питания, фруктовых и овощных соков. Предусматривается также улучшение использования производственных мощностей в консервной и других отраслях с сезонным характером производства, более полное использование сельскохозяйственного сырья и содержащихся в нем полезных веществ для выработки полноценных продуктов питания.

При производстве консервированных фруктовых и овощных соков значительное место в технологических линиях, состоящих из различных машин и аппаратов, занимают процессы тепло- и массообмена. Знание величины затрат тепла и массы на эти процессы необходимо при расчете процессов, машин и аппаратов пищевых производств, а также при расчете экономической эффективности.

За последние 10-15 лет появились многочисленные приложения теории тепло- и массопереноса в технологических процессах. Если в новой технике уровень научных исследований достаточно высок, то в ряде отраслей техники он сильно отстает от современного развития общей теории тепло- и массопереноса. В этой связи возникла актуальная задача исследований тепло- и массообмена при испарении жидкости с поверхности жидких пищевых продуктов. Исследование явлений переноса тепла и вещества представляет не только теоретический интерес, но имеет и непосредственное практическое значение. Область применения практических закономерностей тепло- и массообмена очень велика, т.к. процессы испа-

рения, охлаждения, сушки встречаются в любой отрасли промышленности.

Исследованию процесса теплообмена в условиях массообмена посвящено большое количество работ теоретического и экспериментального характера. Большой вклад в рассматриваемую проблему внесены исследованиями А.В.Дыкова, М.А.Михеева, С.С.Куталадзе, А.С.Клячко, А.В.Нестеренко, Л.Д.Бермана, А.А.Грязнова, В.П.Исаченко, Ф.М.Полонской, Г.Т.Сергеева, З.П.Шульмана, Д.Дальтона, В.Нуссельта, Г.Грасгофа, О.Кришера, Ю.Накатани, И.Канико и др. исследователями.

Результаты исследований процессов тепло- и массообмена при испарении жидкости, проведенных различными авторами, недостаточно согласуются, а иногда носят противоречивый характер.

В настоящей работе поставлены следующие задачи:

1. Экспериментально исследовать процесс испарения виноградного, яблочного и томатного соков с открытой плоской поверхности в машинах и аппаратах при свободном и вынужденном движении потока воздуха.

2. На основе анализа опытных данных рассмотреть вопрос о существовании подобия теплообмена и массообмена при одновременном их протекании.

3. На основании обобщенных опытных данных получить расчетные уравнения тепло- и массообмена при испарении исследуемых соков с открытой поверхности в машинах и аппаратах при свободном и вынужденном движении воздуха.

4. Предложить методику инженерного расчета процесса испарения фруктовых и овощных соков в аппаратах и машинах на ЭВМ.

## I. Анализ теоретических и экспериментальных методов исследования тепло- и массообмена при испарении жидкостей

Процесс испарения жидкости это взаимосвязанный процесс тепло- и массообмена и его необходимо рассматривать как единый процесс переноса энергии, массы и количества движения. Поэтому при испарении жидкости со свободной поверхности практическое использование установленного Дальтоном количественного закона затруднено из-за отсутствия данных при определении коэффициента испарения

$$\beta = \frac{W}{F(P_n - P_b)} \quad /I/$$

Кроме того, скорость испарения жидкости зависит не только от скорости движения воздуха, но и от целого ряда других факторов, таких как: размеры и форма поверхности испарения, физико-химические свойства испаряющейся жидкости и т.п.

Аналитический расчет тепло- и массообмена в условиях испарения капельной жидкости с плоской поверхностью сопряжен с большими трудностями даже в случае ламинарного режима течения в пограничном слое.

Существующие методы аналитического расчета тепло- и массообмена в этих условиях основываются на большом количестве допущений и упрощающих предпосылок, иногда весьма спорных. В настоящее время весьма затруднительно составить замкнутую систему уравнений даже для простейшего случая турбулентного пограничного слоя. Недостающие связи между величинами, входящими в интегральные уравнения энергии, движения и диффузии берут из опыта.

Экспериментальные данные о влиянии массообмена на теплообмен при испарении жидкости вносят противоречивый характер: в одних работах замечено увеличение коэффициента теплообмена по сравне-

нию с "чистым" теплообменом при возрастании интенсивности испарения, в других - уменьшение коэффициента теплообмена в аналогичных условиях.

Широкое распространение в инженерной практике получили эмпирические методы расчета тепло- и массообмена с использованием критериальных уравнений, полученных на основе обработки и обобщения опытных данных с помощью теории подобия.

Из системы дифференциальных уравнений, описывающих перенос тепла и массы, а также условий однозначности для этих процессов получают следующие критерии подобия: критерий Рейнольдса  $Re$ , критерий Грасгофа тепловой  $Gr$ , критерий Грасгофа диффузионный  $Gr_D$ , критерий Прандтля тепловой  $Pr$ , критерий Прандтля диффузионный  $Pr_D$ , критерий Льюиса  $Le$  и другие.

В общем случае уравнения энергии, движения, диффузии в условиях теплообмена без массообмена и с массообменом не аналогичны и расчет массообмена по критериальным зависимостям конвективного теплообмена не допустим. Здесь имеются в виду умеренные температуры до  $373^\circ K$  при атмосферном давлении.

### Экспериментальная часть

#### Методика проведения исследований

При свободном и вынужденном движении воздуха в установке была применена разомкнутая аэродинамическая труба, канал трубы имел сечение  $66 \times 100$  мм. Цилиндрический испарительный сосуд был изготовлен из тонкостенной стали. Подогрев сока в испарительном сосуде проходил в ультратермостате. Заданная постоянная температура масла в термостате и сока в испарительном сосуде поддерживалась автоматически с помощью электрической схемы, показанной на рис. I. Все управление процессами, происходящими в

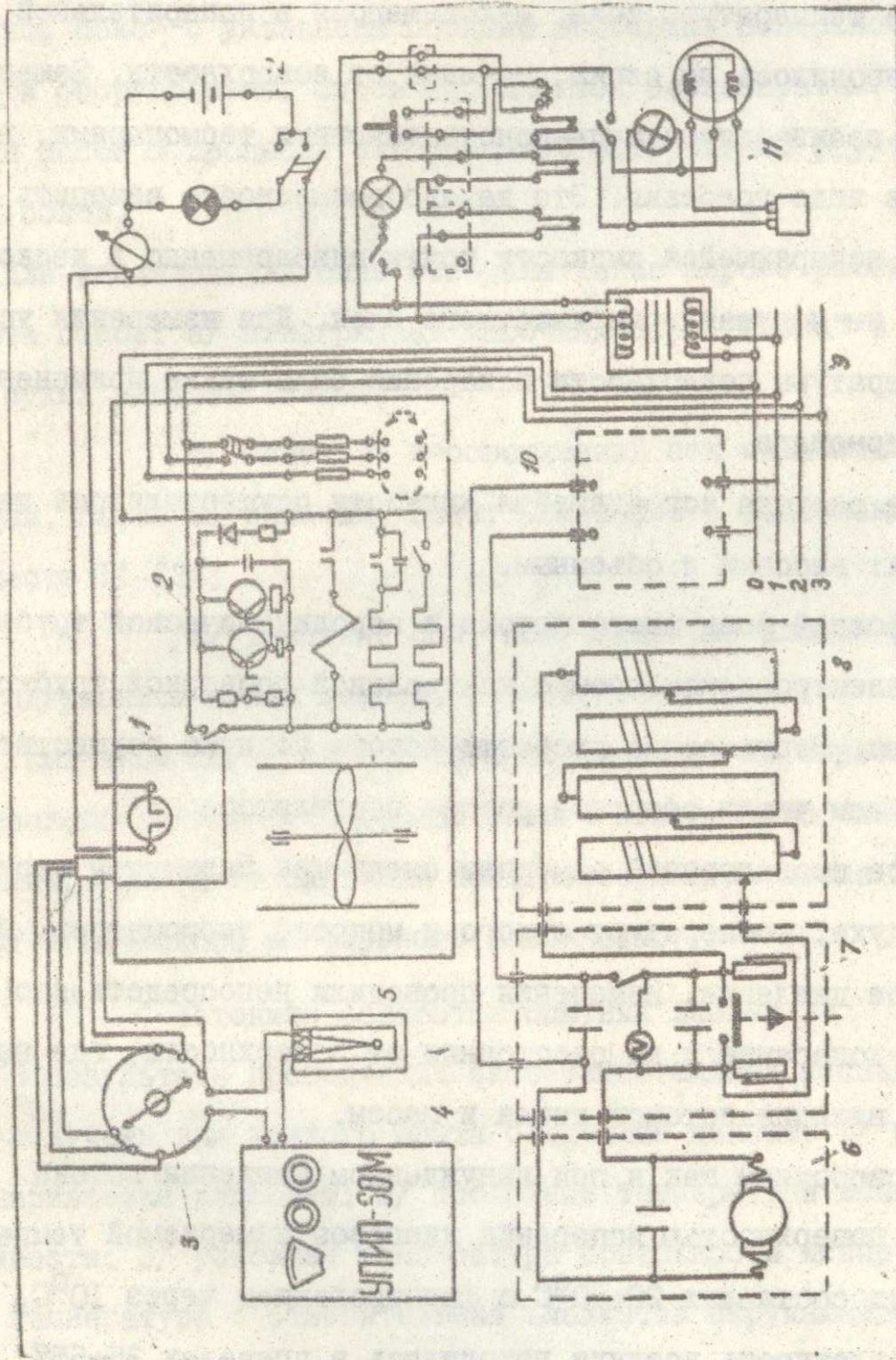


Рис. 1. Электрическая схема установки

I - бокса с исследуемой жидкостью; 2 - электросхема термостата; 3 - переключатель термомпар; 4 - потенциометр; 5 - термостат холодных сплавов; 6 - электродвигатель вентилятора; 7 - пуск ко-регулирующий реостат; 8 - добавочное сопротивление; 9 - питание схемы; 10 - стабилизатор напряжения; 11 - командный электрический прибор; 12 - схема контроля уровня жидкости.

установке, вынесено за пределы зоны испарения на отдельный пульт, смонтированный на передней панели установки.

Измерение температуры сока, находящегося в испарительной боксе, производилось по слоям, начиная от поверхности. Замер температуры производился медь-константановыми термопарами, выполненными в виде гребенки. Это давало возможность измерить температуру испаряющейся жидкости почти одновременно в нескольких точках, не нарушая поверхностного слоя. Для измерения условной температуры поверхности испарения была также применена плавающая термопара.

Измерение расхода испарившейся жидкости осуществлялось двумя способами: весовым и объемным.

Поля скоростей воздушного потока в аэродинамической трубе измерялись электроанемометром с контрольной проверкой трубкой Пито-Прандтля. Регулировка скорости потока воздуха осуществлялась изменением числа оборотов ротора вентилятора.

В процессе исследований измеряли следующие параметры окружающего воздуха: температуру сухого и мокрого термометров, барометрическое давление. Измерения проводили непосредственно у поверхности испарения и на расстоянии от поверхности, где не сказывалось влияние потоков тепла и массы.

Как при свободном так и при вынужденном движении потока воздуха над поверхностью испарения диапазон измеряемой температуры жидкости составлял  $20+80^{\circ}\text{C}$  с фиксированием через  $10^{\circ}\text{C}$ . Относительная влажность воздуха находилась в пределах  $35+55\%$ .

При свободном движении воздуха значение критерия Грасгофа находилось в пределах  $0,18 \cdot 10^6 + 4,09 \cdot 10^6$  для всех исследованных соков, при вынужденном движении воздуха критерий Рейнольдса

## II

изменялся в диапазоне  $0+18 \cdot 10^4$ .

В работе приводятся технологические схемы производства названных соков с указанием позиций свободных поверхностей аппаратов и оборудования. Здесь наблюдаются безвозвратные потери тепла и массы в процессе изготовления натуральных фруктовых и овощных соков.

Для исследований были отобраны такие широко районированные сорта соков: а/ виноградный марочный сорт "Шасла" с содержанием сухих веществ 19-20%;

б/ яблочный неосветленный сок из яблок сортов Джонатан, Кальвиль снежный, Ренет Симиренко с содержанием сухих веществ 11-12%;

в/ томатный сок, полученный из плодов сорта "Маяк", с содержанием сухих веществ 4,5-5%.

Указанные сорта винограда и яблок взяты из сырьевой зоны Одесского опытно-экспериментального консервного завода им. В.И. Ленина, томаты из сырьевой зоны консервного завода "Октябрь" МССР и Одесского консервного комбината.

### Методика обработки опытных данных

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены для каждого опыта следующие данные: 1/ количество испарившейся жидкости; 2/ послойные температуры испаряющейся жидкости; 3/ условная температура поверхности испарения; 4/ температура и относительная влажность окружающего воздуха /набегающего потока/; 5/ поля скоростей воздушного потока.

Интенсивность испарения определялась по выражению

$$W = 3,48 \cdot 10^{-3} \frac{W_0 \rho}{\rho} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$$

Количество тепла, которое подводится к поверхности испарения жидкости, рассчитывалось по формуле

$$Q_{np} = -\lambda_{np} \nabla T \quad \text{Вт/м}^2 \quad /3/$$

Значение коэффициента теплопроводности для исследуемых соков определялось из соотношения

$$\lambda_{np} = \frac{(5,82 - 0,055CB) \cdot 10^{-4}}{1,216 - 0,0036t} (1021 - 0,6t + 4CB) \quad /4/$$

Конвективная составляющая  $Q_k$  полного потока тепла вычислялась из уравнения теплового баланса процесса.

В качестве определяющих критериев в случае теплообмена при свободном и вынужденном движении воздуха были выбраны критерии: Грасгофа тепловой  $Gr$ , Прандтля тепловой  $Pr$ , Рейнольдса  $Re$ , Гухмана  $Gu$ . При массообмене определяющими критериями были: Грасгофа диффузионный  $Gr_d$ , Прандтля диффузионный  $Pr_d$ .

Определяющим критерием в случае теплообмена служил критерий Нуссельта тепловой  $Nu$ , при массообмене критерий Нуссельта диффузионный  $Nu_d$ .

За определяющий размер поверхности тепло- и массообмена принималась сторона квадрата, равная 0,0886 м.

При вычислении критериев подобия в качестве определяющей температуры принималась средняя температура окружающего пространства в случае свободного движения воздуха. Для случая вынужденного движения воздуха определяющей температурой служила средняя температура набегающего потока воздуха.

#### Результаты экспериментального исследования

Все тепло, подведенное к поверхности продукта, можно распределить на три составляющие: тепло, пошедшее на испарение; тепло, переданное воздуху конвекцией и тепло, отданное излучением

$$Q_{np} = Q_u + Q_k + Q_l$$

/5/

Для удобства анализа зависимостей между составляющими потока вводится понятие относительной доли составляющих полного потока тепла:

$\frac{Q_u}{Q_{np}} 100\%$  относительная доля составляющей тепла испарением;

$\frac{Q_k}{Q_{np}} 100\%$  относительная доля конвективной составляющей;

$\frac{Q_l}{Q_{np}} 100\%$  относительная доля лучистого потока тепла.

По данным исследований с ростом перепада температур поверхности испарения и воздуха абсолютные значения  $Q_{np}, Q_u, Q_k, Q_l$  возрастают. Наибольшую активность имеет относительный рост расхода тепла на испарение по сравнению с остальными составляющими потока тепла, что является следствием роста интенсивности молярного переноса при повышении температуры испаряющейся жидкости.

При вынужденном движении воздуха относительная доля тепла, затраченного на испарение, как и при свободном движении воздуха, имеет наибольшее значение. Для виноградного, яблочного и томатного соков доля тепла на испарение составляет 88-98% при различных режимах обтекания воздухом поверхности испарения. С увеличением числа Рейнольдса для всех исследуемых соков наблюдается уменьшение относительной доли тепла на излучение и доли конвективной составляющей. Это объясняется уменьшением температуры поверхности испарения с увеличением скорости воздуха при неизменной или слабо изменяющейся температуре воздуха. Относительная доля лучистой составляющей для всех соков находится в пределах 0,6-6,0%, конвективной - 0,6-10,0%.

При вынужденном движении омывающего воздушного потока характер изменения интенсивности испарения томатного сока представлен на рис. 2, здесь же для сравнения показана кривая зависимости испарения сока с плоской поверхности при свободном движении окружающей среды. Аналогичные зависимости приводятся в работе для виноградного и яблочного соков. Интенсивность испарения возрастает с увеличением скорости воздушного потока, если сравнение производить при одной и той же температуре. Наибольшая интенсивность испарения по данным экспериментов наблюдается у яблочного сока, меньшие абсолютные значения у виноградного сока и еще менее интенсивно испарение у томатного сока. Это, как и в случае свободного движения воздуха можно объяснить различным содержанием сухих веществ в исследуемых соках, а также различными физико-химическими показателями подвергнутых исследованию соков.

#### Обработка экспериментальных данных в критериальных зависимостях

При свободном движении воздуха обработка экспериментальных данных по теплообмену производилась в соответствии с зависимостью вида

$$Nu = f(Gr \cdot Pr)$$

/6/

В диссертационной работе приводится графическая зависимость теплового критерия Нуссельта  $Nu$  от обобщенного критерия  $(Gr \cdot Pr)$  для виноградного сока. Графическое решение дает возможность установить величину показателя степени у обобщенного критерия  $(Gr \cdot Pr)$ , а также множителя перед ним.

Из графиков получены такие выражения: для виноградного сока при значении  $(Gr \cdot Pr) = (0,13 \div 2,74) \cdot 10^6$

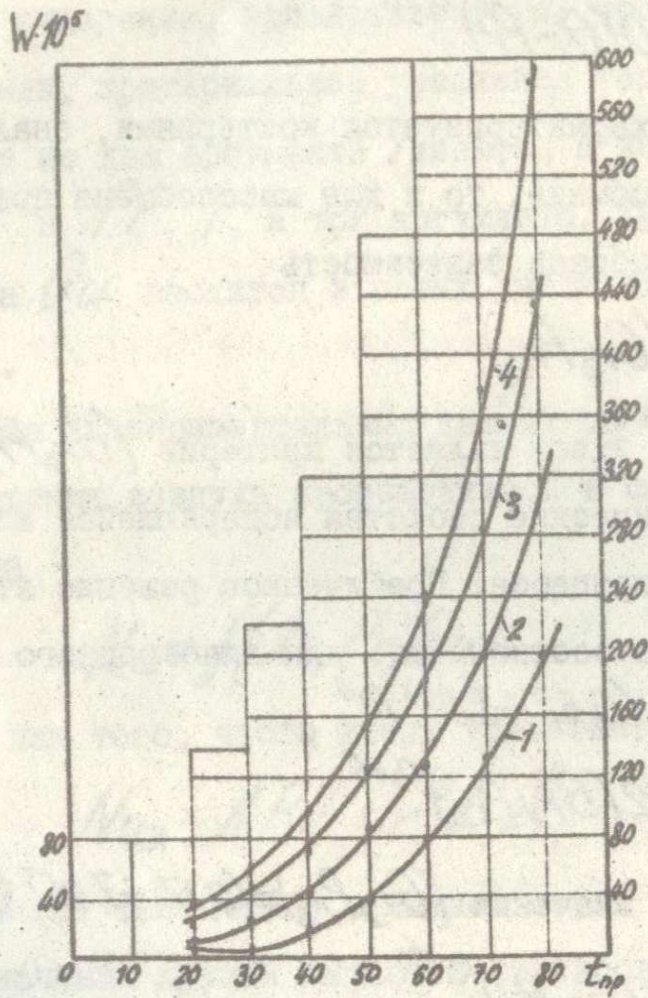


Рис. 2  
 1- свободное движение  
 2-  $v=1\text{ м/с}$   
 3-  $v=2\text{ м/с}$   
 4-  $v=3\text{ м/с}$

$$Nu = 0,48(GrPr)^{0,23} \quad /17/$$

для яблочного сока при значении  $(GrPr) = (0,12 \div 2,21) \cdot 10^6$

$$Nu = 0,44(GrPr)^{0,24} \quad /18/$$

для томатного сока при значении  $(GrPr) = (0,13 \div 2,81) \cdot 10^6$

$$Nu = 0,40(GrPr)^{0,23} \quad /19/$$

Так как массообмен характеризуется критериями, аналогичными критериям при теплообмене, то и для массообмена при свободном движении воздуха выбрана зависимость

$$Nu_2 = f(Gr_2, Pr_2) \quad /10/$$

Определяющим критерием здесь является критерий  $(Gr_2, Pr_2)$ , который отображает физические свойства испаряющейся жидкости, а также гидродинамику процесса. Графическое решение этих зависимостей дает следующие соотношения: для виноградного сока, если значение  $(Gr_2, Pr_2) = (0,58 \div 8,98) \cdot 10^6$

$$Nu_2 = 0,22(Gr_2, Pr_2)^{0,46} \quad /11/$$

для яблочного сока при значении  $(Gr_2, Pr_2) = (0,50 \div 7,46) \cdot 10^6$

$$Nu_2 = 0,61(Gr_2, Pr_2)^{0,69} \quad /12/$$

для томатного сока в интервале  $(Gr_2, Pr_2) = (0,48 \div 9,18) \cdot 10^6$

$$Nu_2 = 0,19(Gr_2, Pr_2)^{0,31} \quad /13/$$

По вычисленным значениям тепловых и диффузионных критериев Нуссельта можно судить, что величина  $Nu_2$  больше значения  $Nu$  для одинаковых опытов. Различие в величине  $Nu_2$  и  $Nu$  из одного эксперимента объясняется существованием одновременно протекающих процессов тепло- и массообмена при испарении и взаимным

17  
влиянием массообмена на теплообмен.

В турбулентном режиме обтекания результаты опытов показали, что на интенсивность испарения исследуемых жидкостей большее влияние оказывает изменение скорости воздушного потока, чем изменение температуры.

При вынужденном движении омывающего потока в условиях теплообмена при испарении, вследствие того, что массообмен влияет на теплообмен, критериальное уравнение теплообмена должно содержать уже не два аргумента /имеются в виду классические критерии  $Re$  и  $Pr$  /, а три аргумента. Третий аргумент - критерий Гухмана  $Gu$  вводится в целях учета влияния массообмена на теплообмен.

Обработка экспериментальных данных по теплообмену при вынужденном движении воздуха производилась в соответствии с зависимостью вида

$$Nu = f(Re, Pr, Gu) \quad /14/$$

Обычно для того, чтобы иметь уравнение типа

$$Nu_D = A Re^x Pr^y Gu^z \quad /15/$$

опыты проводят так, чтобы в каждой серии изменялся один из критериев, значения других пытаются фиксировать. Если это возможно осуществить, то для определения параметров  $A, x, y, z$  поочередно применяется известная методика выравнивания точек в логарифмических координатах. Такая методика нашла применение в данной работе при обработке экспериментальных данных по тепло- и массообмену в случае свободного движения воздуха над генерирующей поверхностью. При большем числе изменяющихся критериев выше-названный способ обработки реализовать трудно, т.к. критерии в

№ В. 1013779

каждом опыте имеют отличные от других значения. Поэтому применена другая методика определения параметров уравнения /15/.

В случае теплообмена и массообмена выражение приводится к виду

$$y = a_0 \prod_{i=1}^m x_i^{a_i} \quad /16/$$

В этой зависимости необходимо определить коэффициенты уравнения  $a_0 - a_i$ . Для применения метода наименьших квадратов зависимость /16/ представляется в линеаризованном виде

$$\ln y = \ln a_0 + \sum_{i=1}^m a_i \ln x_i \quad /17/$$

Для определения коэффициентов уравнения /15/ была составлена программа на языке АЛГАМС, разновидности общепринятого алгоритмического языка АЛГОЛ. Оформление программ выполнено в виде алгоритмической процедуры, использующей эталонный язык в соответствии с канонизированными требованиями.

Программой предусмотрены, кроме основной цели - нахождения значений коэффициентов уравнения, также определение остаточной дисперсии для уравнения /17/, определение остаточного дисперсионного отношения, характеризующего адекватность полученной зависимости.

Проверочный расчет показал ошибку в произведенном решении  $\pm 6\%$ .

Машинному счету подверглись значения критериев подобия  $Nu$ ,  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Pr_2$ ,  $Bu$ . В результате реализации составленной программы были получены значения коэффициентов уравнения. Эти значения позволяют записать следующие выражения. В случае теплообмена для виноградного сока полученная формула имеет вид:

$$Nu = 10,37 Re^{0,33} Pr^{3,01} Bu^{0,19} \quad /18/$$

для яблочного сока

$$Nu = 9,08 Re^{0,31} Pr^{1,77} Gu^{0,93} \quad /19/$$

для томатного сока

$$Nu = 8,52 Re^{0,41} Pr^{4,62} Gu^{0,62} \quad /20/$$

При массообмене получены выражения:

для виноградного сока

$$Nu_D = 10,13 Re^{0,75} Pr_D^{0,67} Gu^{0,05} \quad /21/$$

для яблочного сока

$$Nu_D = 10,02 Re^{0,86} Pr_D^{1,94} Gu^{0,46} \quad /22/$$

для томатного сока

$$Nu_D = 10,04 Re^{0,76} Pr_D^{0,12} Gu^{0,02} \quad /23/$$

Формулы /7-9/, /11-13/ и /18-23/ пригодны для практических расчетов, однако следует отметить, что эти зависимости справедливы тогда, когда поток тепла направлен от поверхности жидкости к окружающей среде, рабочей жидкостью являются вышеназванные соки и когда форма поверхности геометрически подобна исследованной.

Действие указанных формул можно распространить и на сосуды и емкости промышленного образца, если в условиях производства процесс испарения будет происходить с плоской поверхности, поток влажного воздуха будет направлен параллельно поверхности испарения и форма этой поверхности будет геометрически подобна исследованной. Кроме того, необходимыми условиями применения полученных выражений должно быть соответствие гигрометрического состояния среды и гидродинамика обтекания.

Значительная потеря тепла и массы в связи с испарением ис-

следованных соков при их производстве дает возможность сделать некоторые замечания и рекомендации. Как ранее указывалось, в технологических линиях переработки сырья на соки отмечается значительная свободная поверхность. В производственном внедрении предложены два варианта уменьшения открытой поверхности. По первому варианту процессы получения сока построены таким образом, что исключаются из аппаратного комплекса сборники массы. По второму частично закрыта /на 95-98%/ открытая поверхность продукта. Полное перекрытие нагретой поверхности влечет за собой удорожание самой машины или аппарата. В этом случае должна быть увеличена толщина стенки, так как разность давлений - снаружи атмосферного и внутри вакуума из-за частичной конденсации пара жидкости, может привести к разрушению машины или аппарата. Для частичного перекрытия поверхности жидкости использованы полые крышки из нержавеющей стали и алюминия. Также успешно применены вспененные шарики диаметром 3-6мм из полистирола. Использование названных конструкций позволило значительно сократить потери тепла и массы.

Подсчитанная экономическая эффективность внедрения результатов исследований данной работы составляет 8395 руб/год. работа внедрена в объединении "Одесплодоовощпром".

Применение теории погрешностей дало возможность в настоящей работе найти предельные относительные  $\delta$  и абсолютные  $\varepsilon$  ошибки в определении основных параметров.

Средняя относительная ошибка при измерении температуры различных сред составила  $\delta_t \pm 0,38\%$ .

Среднеарифметическая предельная абсолютная ошибка определения величины плотности потока массы равняется  $\varepsilon_w = \pm 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^2 \text{ с}$ .

В наиболее неблагоприятном случае совпадения знаков погрешностей определения величин, входящих в выражение для определения теплового числа Нуссельта, средняя погрешность составляет  $\pm 12,58\%$ , при минимальном значении  $\pm 10,41\%$ . В аналогичных условиях средняя погрешность в определении массообменного числа Нуссельта составляет  $\pm 4,36\%$ , при минимальном значении  $\pm 1,74\%$ .

### Выводы

Результаты настоящей экспериментальной работы дают возможность сделать следующие выводы:

1. Экспериментальное исследование теплообмена при испарении фруктовых и овощных соков в машинах и аппаратах консервного производства позволило определить количественное соотношение составляющих потока тепла.
2. Экспериментальные и расчетные данные работы показывают, что преобладающее значение по отдельным составляющим полного теплового потока имеет расход тепла на испарение жидкости и составляет в относительных значениях от 82 до 97%.
3. Наибольшая интенсивность испарения как в условиях свободного движения воздуха, так и при вынужденном движении замечена у яблочного сока, наименьшая - у томатного.
4. Значения массообменных критериев Нуссельта во всех опытах по абсолютному значению оказались больше значений тепловых чисел Нуссельта.
5. Соотношение Льюиса для случая испарения исследуемых соков при свободном движении воздуха не получило экспериментального подтверждения результатами настоящей работы. В данном случае соотношение Льюиса не является величиной постоянной, а изменяется в широких пределах в зависимости от  $\Delta t = t_n - t_0$ .

6. В произведенных опытах с ростом относительного расхода испаряющейся жидкости коэффициент теплообмена увеличивается, т.е. происходит интенсификация теплообмена с увеличением массообмена.

7. Опытные данные по теплообмену обобщены в виде зависимостей:

Вид сока	Соотношение ! Свободное движение !		Вынужденное движение			
	$Nu = A(Gr \cdot Pr)^n$		$Nu = A Re^x Pr^y Gu^z$			
	$A$	$n$	$A$	$x$	$y$	$z$
Виноградный	0,475	0,226	10,37	0,33	3,01	0,19
Яблочный	0,438	0,236	9,08	0,31	1,77	0,93
Томатный	0,404	0,231	8,52	0,41	4,62	0,62

8. Экспериментальные данные по массообмену обобщены в виде зависимостей:

Вид сока	Соотношение ! Свободное движение !		Вынужденное движение			
	$Nu_D = A'(Pr_D \cdot Gr_D)^{n'}$		$Nu_D = A' Re^{x'} Pr^{y'} Gu^{z'}$			
	$A'$	$n'$	$A'$	$x'$	$y'$	$z'$
Виноградный	0,221	0,464	10,13	0,75	0,67	0,05
Яблочный	0,611	0,698	10,02	0,86	1,94	0,46
Томатный	0,196	0,314	10,04	0,76	0,12	0,08

9. Опытные данные настоящего исследования для расчета коэффициентов тепло- и массообмена определены с вполне удовлетворительной точностью. Минимальная погрешность определения числа Нуссельта теплового составляет  $\pm 10,4\%$ , максимальная  $\pm 14,8\%$ .

Минимальная погрешность определения числа Нуссельта массообменного составляет  $\pm 1,7\%$ , максимальная погрешность  $\pm 6,9\%$ .

10. Полученные критериальные зависимости могут быть использованы при расчете тепломассообмена в машинах и аппаратах консерв-

ного и винодельческого производства.

II. Экономическая эффективность внедрения исследований составляет 8395руб/год.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Волчок А.Н. Экспериментальное исследование процесса испарения некоторых жидких пищевых продуктов.-В кн.:Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР. Киев: Вища школа, 1973, вып.9, с.44-45.
2. Волчок А.Н. Испарение виноградного сока со свободной поверхности.-Консервная и овощесушильная промышленность, 1973, №8, с.38-39.
3. Волчок А.Н. Об испарении фруктовых соков со свободной поверхности.-Изв.вузов. Пищевая технология. 1974, №3, с.161-162.
4. Волчок А.Н. Исследование испарения фруктовых и овощных соков.-В кн.:Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР. Киев:Вища школа, 1975, вып.10, с.60-61.

## Обозначения

$\alpha$  - коэффициент теплообмена;  $\beta_c$  - коэффициент массообмена, отнесенный к разности концентраций;  $\beta_p$  - коэффициент массообмена, отнесенный к разности парциальных давлений;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $a$  - коэффициент температуропроводности;  $c$  - удельная теплоемкость;  $\rho$  - плотность;  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости;  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости;  $\varphi$  - относительная влажность воздуха;  $D$  - коэффициент диффузии;  $d$  - диаметр;  $F$  - площадь испарения;  $L$  - определяющий размер;  $\beta$  - коэффициент объемного расширения;  $g$  - ускорение силы тяжести;  $x, h$  - расстояние;  $T, t$  - температура;  $r$  - удельная теплота парообразования;  $\rho$  - плотность потока массы;  $Q$  - количество тепла;  $q$  - тепловой поток;  $m$  - масса;  $R$  - газовая постоянная;  $v$  - скорость;  $p$  - давление;  $\nabla T$  - градиент температуры;  $Nu$  - критерий Нуссельта тепловой;  $Nu_D$  - критерий Нуссельта массообменный;  $Re$  - критерий Рейнольдса;  $Pr$  - критерий Прандтля;  $Pr_D$  - критерий Прандтля массообменный /критерий Шмидта/;  $Gu$  - критерий Гухмана;  $Le$  - критерий Льюиса;  $св$  - сухие вещества.

Индексы:  $n$  - параметры, относящиеся к поверхности испарения;

$v$  - параметры, относящиеся к воздуху;  $D$  - параметры, относящиеся к диффузионным процессам;  $np$  - величины, характеризующие исследуемый продукт.