

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР  
КИЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специализированный совет Д 068.17.04

На правах рукописи

КОПЫЛЕНКО Анатолий Васильевич

УДК 66.015.28

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ В КОЛОННЫХ АППАРАТАХ  
С ЦИКЛИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ

Специальность 05.18.12

Процессы и аппараты  
пищевых производств

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1983

Работа выполнена в Киевском ордена Трудового Красного  
Знамени технологическом институте пищевой промышленности

Научный руководитель -  
кандидат технических наук, доцент ТАРАН В.М.

Официальные оппоненты -  
доктор технических наук, профессор ФЕДОТКИН И.М.  
кандидат технических наук, доцент ОСИПЕНКО А.А.

Ведущее предприятие - Украинский научно-исследовательский  
институт спиртовой и ликеро-водочной  
промышленности /г.Киев/

Защита состоится " \_ " \_\_\_\_\_ 1984 г. в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании специализированного Совета Д 068.17.04 Киевского  
ордена Трудового Красного Знамени технологического института  
пищевой промышленности по адресу:  
252017, Киев, ул.Владимирская, 68, ауд.А-311

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского  
ордена Трудового Красного Знамени технологического института  
пищевой промышленности.

Автореферат разослан " \_ " \_\_\_\_\_ 1983 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат технических наук ТАРАН В.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Решениями XXVI съезда КПСС и майского /1982г./ Пленума ЦК КПСС предусмотрен дальнейший рост благосостояния советского народа на основе использования в народном хозяйстве достижений научно-технического прогресса, в частности, за счет совершенствования методов осуществления технологических процессов.

Для реализации задач, поставленных партией перед пищевой промышленностью, за последние годы был разработан ряд направлений интенсификации массообменных процессов - использование современных конструкций контактных устройств, применение пульсационных режимов работы, режимов с периодическим сбросом давления и др. Повышенное внимание привлекает также новый метод осуществления процессов в контролируемом циклическом режиме /КЦР/, суть которого заключается в периодической подаче фаз в колонну, как один из наиболее экономически выгодных и перспективных.

Цель работы. Совершенствование аппаратного оформления и интенсификация процесса массообмена в системе газ /пар/-жидкость при циклическом режиме работы колонных установок. Исследование и разработка конструкций контактных устройств /к.у./ для работы в циклическом режиме применительно к перегонке спиртосодержащего сырья и абсорбции диоксида углерода.

### Научная новизна:

- обоснован, исходя из анализа работы колпачковых и ситчатых провальных тарелок в контролируемом циклическом режиме, оптимальный диапазон изменения управляющих параметров;
- разработан новый тип комбинированного клапанно-ситчатого контактного устройства и определены его оптимальные геометрические размеры;
- исследованы гидродинамические и массообменные характеристики колпачковых, ситчатых провальных, комбинированных клапанно-ситчатых тарелок в КЦР и предложены математические зависимости для их расчета;
- обосновано и математически описано влияние КЦР на степень продольного перемешивания фаз в колонне с исследованными тарелками;
- предложена и проверена на адекватность математическая модель колонного аппарата при циклическом вводе фаз в зону контакта;

- исследован характер изменения эффективности к.у. по высоте аппарата и проведен расчет средней эффективности колонны в зависимости от параметров циклического процесса.

Практическая ценность:

- осуществлен выбор оптимальных значений управляющих факторов в контролируемом циклическом режиме для колпачковых и ситчатых провальных тарелок;

- разработана конструкция к.у. клапанно-ситчатого типа, защищенная авторским свидетельством СССР, позволяющая снизить продольное перемешивание в колонне и увеличить эффективность ее работы;

- на основе экспериментальных данных доказано увеличение эффективности работы колонн спиртового производства и сатурационных установок в контролируемом циклическом режиме, по сравнению с режимом стационарного противотока.

Реализация результатов исследования. Осуществлен перевод в циклический режим работы колонны укрепления эфирно-альдегидной фракции спиртового отделения ПО "Бобрыйскгидролизпром" Главмикропрома СССР и сатурационной установки линии производства безалкогольных напитков Ивано-Франковской пищевкусовой фабрики Минпищепрома УССР. Реальный экономический эффект от внедрения составляет свыше 5000 руб. в год.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на У Республиканской конференции "Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств", г. Днепропетровск, 1980 г.; на 44, 46-49 научных конференциях КТИПН в 1978, 1980-1983 гг.

Публикация результатов исследований. По теме диссертации опубликовано пять печатных работ и получено авторское свидетельство СССР на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка использованной литературы, включающего 166 отечественных и зарубежных источников и приложения.

Представлены протокол испытаний и акты о внедрении циклических режимов работы массообменной аппаратуры в производство.

Основная часть изложена на 287 стр. машинописного текста, содержит 56 рисунков, 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Аналитический обзор.

В главе представлен анализ технологических особенностей циклических режимов работы массообменных аппаратов применительно к ректификации, абсорбции, экстракции и другим процессам пищевого и химического производств. Рассмотрены устройство и принцип действия различных типов контактных устройств при работе в КЦР. Отмечено, что перевод существующего оборудования в циклический режим позволяет существенно повысить его эффективность и производительность при сравнительно небольших затратах на реконструкцию. Вместе с тем широкое распространение нового метода в промышленности в настоящее время ограничено вследствие отсутствия надежных, быстродействующих и долговечных механизмов управления процессом.

Представлен теоретический расчет эффективности работы колонны и отдельного контактного устройства, применение которого требует наложения ряда ограничений, существенно упрощающих картину происходящего в колонне. Отмечается наличие аналогии между массообменом на тарелке в циклическом и стационарном режимах, что дает возможность использовать для расчета циклических процессов известный математический аппарат, неоднократно апробированный при расчете колонн, работающих в традиционном режиме стационарного противотока.

На основании вышеизложенного были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

2. Исследование гидродинамики различных типов контактных устройств в циклическом режиме

Экспериментальные исследования проводили на лабораторной установке, включающей в себя колонну диаметром 140 мм, вентилятор высокого давления ВВД-5 и систему воздухопроводов. Установка была укомплектована необходимой контрольно-измерительной аппаратурой и устройством для трассирования потока. На входе и выходе каждой из фаз для обеспечения циклического режима работы установлены запорные клапаны-отсекатели, управление работой которых осуществляется блоком электронных реле времени по специальной программе.

Газо-жидкостные нагрузки изменяли в следующих пределах: скорость газа в колонне - от 0,2 до 1,5 м/с, удельную жидкостную

нагрузку - от 0,0028 до 0,012 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>с.

Предварительные опыты подтвердили необходимость создания конструкций к.у., обеспечивающих поршневой режим перетока жидкости с учетом раздельного ввода фаз в колонну. Для испытаний было предложено массообменное устройство на базе серийной ситчатой тарелки без переливных элементов /Положительное решение по заявке 3397912/23-26. Приоритет от 18.02.1982г./.

Запорными элементами новой тарелки служат клапаны, установленные ниже основного массообменного полотна и обеспечивающие кратность обмена Ф=1.

Конструктивные и геометрические характеристики выбранных для исследования к.у. представлены в табл. I.

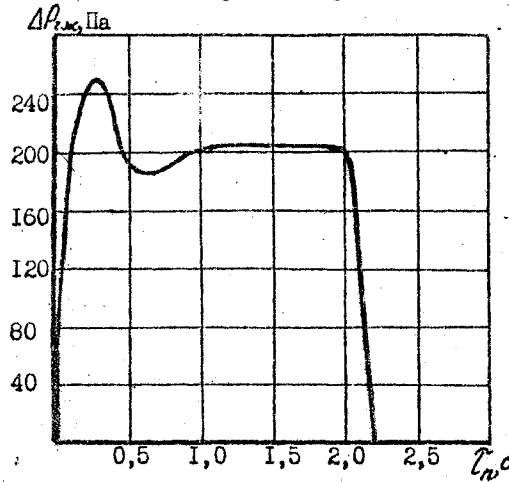
Таблица I.

Номер тарелки	Тип тарелки	Диаметр тарелки φ	Свободное сечение	Количество отверстий в ситчатом полотне
1	2	3	4	5
I	Колпачковая	0,14	10	-
2а	Ситчатая провальная	0,14	10	24
2б	-"-	-"-	12	29
2в	-"-	-"-	14	36
3а	Комбинированная	0,14	10	24
3б	-"-	-"-	12	29
3в	-"-	-"-	14	36

Известно, что пульсирующая подача контактирующих фаз способствует дополнительному вводу энергии в колонну и турбулизации газо-жидкостного слоя на тарелке за счет использования ударного действия газового потока в момент открытия клапана на воздуховоде. В качестве фактора, аппроксимирующего изменение импульса давления газа во времени, использовали гидравлическое сопротивление газо-жидкостного слоя в течение одного парового периода /рис. I/. Перепад давления измеряли датчиком мембранного типа ДТ-50 с последующим преобразованием электрического сигнала и фиксацией его на фотодиаграмме светолучевого осциллографа. Наибольший интерес с точки зрения объяснения интенсификации массообмена в циклическом ре-

жине представляет гидродинамика начального периода  $/0 \pm 0,5с/$ , когда после резкого открытия клапана поток газа, имеющий высокие кинетические характеристики, вводится в слой неподвижной жидкости на тарелке, что способствует развитию межфазной поверхности контакта, быстрому ее обновлению и интенсифицирует процесс массообмена на к.у. Преимущества циклического метода ведения процесса

Рис.1. Сопротивление газо-жидкостного слоя на колпачковой тарелке в течение парового периода



могут быть реализованы при организации однократной смены жидкостной задержки на тарелках колонны, когда  $\tau_{жс} = \tau_{ол}$ . Однако реальное осуществление такого режима в колонне с ситчатыми тарелками свободным сечением 10-14% связано с недопустимо высокой степенью перемешивания жидкой фазы по высоте колонны, вызывающего снижение разности концентраций на соседних ступенях и падение движущей силы процесса массообмена. Величина  $\phi$  на

комбинированных клапанно-ситчатых тарелках, благодаря наличию запорного устройства, практически не зависит от длительности жидкостного периода и нагрузки по жидкости.

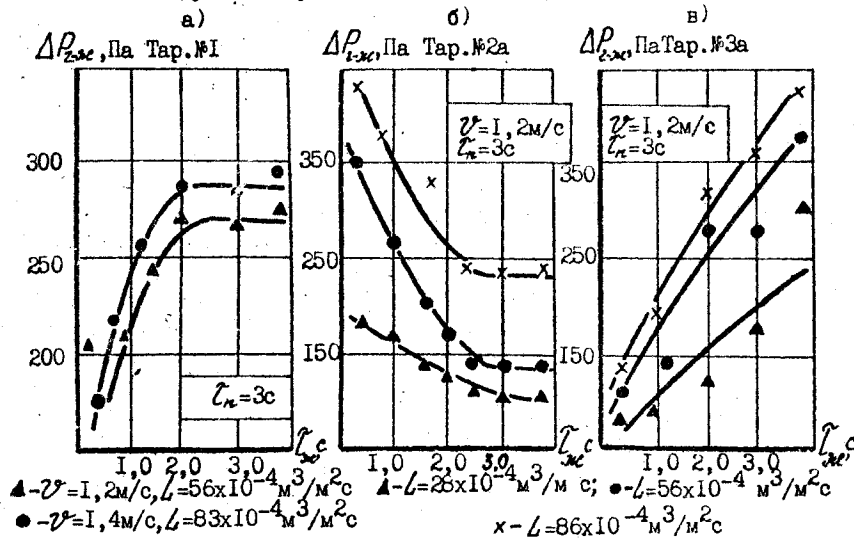
Кроме того, при открытии клапанов поток газовой фазы барботирует через слой жидкости, стекающей в клапанное отверстие, т.е. в начальный момент парового периода на клапанной части комбинированного контактного устройства образуется дополнительная зона контакта, наличие которой способствует повышению эффективности разделения перегоняемой смеси.

При исследовании гидродинамики установлено, что гидравлическое сопротивление сухих тарелок в циклическом режиме при длительности парового периода 0,5-5,0с практически полностью совпадает с данными, полученными для стационарных условий. В результате

эксперимента были определены коэффициенты местных сопротивлений выбранных конструкций к.у. в сопоставляемых режимах.

Сопротивление газо-жидкостного слоя на тарелках при работе в циклическом режиме зависит от плотности орошения, скорости газа в колонне и продолжительности жидкостного периода /Рис.2/. Из представленных графиков следует, что на характер изменения  $\Delta P_{г-жс}$  существенное влияние оказывает, помимо перечисленных выше факторов, конструкция контактного устройства. Так при увеличении продолжительности  $\tau_{жс}$  на колпачковых тарелках наблюдается рост  $\Delta P_{г-жс}$  с последующей стабилизацией сопротивления /Рис.2а/. Для тарелок провального типа /Рис.2б/, возрастание высоты вспененного слоя и  $\Delta P_{г-жс}$  отмечено при уменьшении длительности жидкостного периода, причем это явление наиболее заметно для тарелок с уменьшенным свободным сечением.

Рис.2. Сопротивление газо-жидкостного слоя на исследуемых тарелках в циклическом режиме



В отличие от колпачковых и провальных контактных устройств, для комбинированных тарелок наблюдается устойчивый рост  $\Delta P_{г-жс}$  высоты пенного слоя по мере увеличения длительности жидкостного периода



во всем исследуемом диапазоне  $\tau_{жс} = 0,5 \div 4,0$  с /Рис.2в/, что объясняется возрастанием объема жидкостной задержки на тарелке питания, а затем, в процессе работы, на всех тарелках колонны.

При обработке экспериментальных данных, полученных при циклическом режиме работы установки по методу наименьших квадратов на ЭВМ "Напри-2", были получены аналитические зависимости для расчета  $\Delta P_{2-жс}$  на колпачковых, ситчатых провалных и комбинированных тарелках, адекватно описывающие процесс при 10% уровне значимости в доверительном интервале 90%:

для колпачковых тарелок -

$$\Delta P_{2-жс} = 11,58 L^{0,21} v^{0,91} \tau_n^{0,03} \tau_{жс}^{0,16} \quad /1/$$

для провалных тарелок -

$$\Delta P_{2-жс} = 81,6 L^{0,33} v^{1,77} \tau_n^{0,08} \tau_{жс}^{0,45} S_{сб}^{-0,43} \quad /2/$$

для комбинированных тарелок -

$$\Delta P_{2-жс} = 16,0 L^{0,44} v^{0,55} \tau_n^{0,09} \tau_{жс}^{1,62} S_{сб}^{-0,1} \quad /3/$$

В результате исследования установлено весьма незначительное влияние на гидродинамические характеристики к.у. продолжительности парового периода, поэтому целесообразно выбирать длительность  $\tau_n$  для всех конструкций тарелок в диапазоне 1,5-4,0 с.

Пределы устойчивой работы колонны при различных режимах являются одной из существенных характеристик аппарата, определяющих диапазон варьирования управляющих факторов, а, следовательно, и выбор оптимальных условий эксплуатации.

При работе колонн в стационарных условиях нижний предел устойчивой работы колонны однозначно зависит от скорости газа, при которой прекращается провал жидкости на нижележащие контактные устройства.

При работе колонн в циклическом режиме, кроме скорости газа, следует учитывать также продолжительность периодов  $\tau_n$  и  $\tau_{жс}$ . Так, например, для колпачковых тарелок минимальной продолжительностью  $\tau_{жс}$  является 1,5-2,0 с, поскольку уменьшение длительности жидкостного периода ниже указанного значения сопровождается резким снижением  $\Delta P_{2-жс}$  за счет уменьшения высоты барботажного слоя. При выборе нижней границы диапазона  $\tau_n$  установлено, что компромиссная величина минимума  $\tau_n$  не должна быть меньше 1,0-1,5 с, что связано с разрешающей способностью обеспечиваемого оборудования.

Верхний предел работы исследуемых тарелок ограничен допустимой нормой брызгоуноса, величину которого определяли путем непосредственного измерения массы жидкости, уносимой на вышележащую тарелку. При возрастании газо-жидкостной нагрузки брызгоунос  $E$  повышается на всех исследуемых тарелках, как в стационарном, так и в циклическом режимах. К росту  $E$ , при прочих равных условиях, приводит также увеличение общей продолжительности цикла  $T_{\text{ц}}$  и уменьшение свободного сечения тарелки.

При сравнении стационарного и циклического режимов установлено, что для всех исследованных конструкций капельный унос в КЦР существенно ниже, причем наиболее заметная разница для сопоставляемых режимов получена при скоростях газа, близких к предельным, что свидетельствует о расширении диапазона устойчивой работы колонны. В результате обработки данных эксперимента получены расчетные зависимости уноса жидкости от различных параметров циклического процесса:

колпачковые тарелки - 6	
$E = 0,35 \cdot L^{0,1} \cdot v^{2,74} \cdot T_{\text{ц}}^{0,1}$	14/
провальные тарелки -	
$E = 2,31 \cdot L^{0,32} \cdot v^{2,12} \cdot T_{\text{ц}}^{0,27} \cdot S_{\text{сб}}^{-2,01}$	15/
комбинированные тарелки -	
$E = 5,92 \cdot L^{0,47} \cdot v^{2,32} \cdot T_{\text{ц}}^{0,23} \cdot S_{\text{сб}}^{-2,82}$	16/

Уровень значимости полученных уравнений 8% в доверительном интервале 92%.

### 3. Исследование структуры потоков и перемешивание в циклическом режиме

Интенсивность перемешивания и режим движения жидкости в период  $T_{\text{ж}}$  оценивались по дисперсии  $\sigma_{\theta}^2$  распределения времени пребывания жидкости на каскаде, состоящем из 5 тарелок. Величину  $\sigma_{\theta}^2$  для различных режимов определяли на основе обработки кривых отклика системы на импульсное возмущение.

Из анализа экспериментальных данных следует, что величина дисперсии среднего времени пребывания жидкостного потока зависит от конструкции массообменных устройств и для исследуемых тарелок изменяется в широком диапазоне 0,19-0,7. При оценке влияния ре-

жимных параметров на  $\sigma_{\theta}^2$  отмечено, что наибольшим управляющим воздействием на степень перемешивания жидкости обладает продолжительность жидкостного периода  $\tau_{жс}$ , определяющая наряду с плотностью орошения  $L$  и скоростью газа  $v$  профиль концентраций трассера по высоте колонны. При этом наименьшие значения  $\sigma_{\theta}^2$ , соответствующие минимальному перемешиванию, совпадают для всех конструкций тарелок с продолжительностью  $\tau_{жс}$ , при которой обеспечивается однократное вытеснение жидкостной задержки с тарелки на тарелку, т.е.  $\Phi=1$ . Сравнение работы различных конструкций контактных устройств свидетельствует, что минимальные значения  $\sigma_{\theta}^2$  были получены на комбинированных тарелках, для которых характерен также наиболее широкий диапазон устойчивой работы при изменении  $L$  и  $\tau_{жс}$ . В колонне с циклическим режимом эксплуатации установлено, что жидкостный поток перемещается во время  $\tau_{жс}$ , когда отсутствует подача паровой фазы. Во время парового периода жидкость, не перемещаясь по ступеням контакта, интенсивно перемешивается паром в пределах объема, ограниченного двумя соседними тарелками колонны и вся колонна представляется в виде каскада последовательно соединенных реакторов, связь между которыми осуществляется движущимися в период  $\tau_{жс}$  потоками жидкой фазы. Следовательно, циклический процесс в массообменной колонне практически полностью совпадает с физической сущностью ячеечной модели. При этом принимается, что в каждой из таких ячеек поток имеет структуру полного перемешивания, концентрация  $C_z$  в любой момент времени одинакова для всего объема ячейки, а между ячейками перемешивание отсутствует.

Решение уравнения ячеечной модели, представляющее собой математическое описание изменения концентраций в каскаде из  $n$  тарелок, получено с использованием метода преобразования по Лапласу в виде:

$$C_{вых}(t) = C_{вх}(\tau) = \frac{1}{(n-1)!} \cdot \left(\frac{nt}{\tau}\right)^{n-1} \cdot \frac{n}{\tau} \cdot e^{-\frac{nt}{\tau}} \quad (7)$$

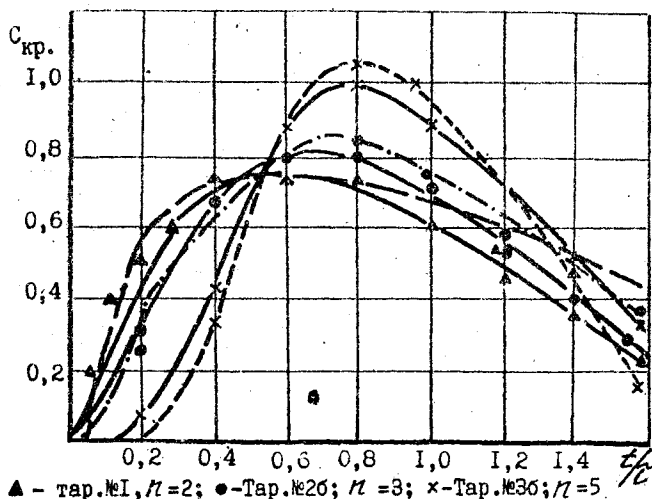
где  $n$  - количество ячеек полного перемешивания;  
 $\tau$  - среднее время пребывания частиц потока в колонне.

Адекватность модели определялась путем сравнения кривых отклика, полученных из расчета и на основе экспериментальных данных /рис.3/.

Как следует из анализа представленных графических зависимостей, колонный аппарат, работающий в управляемом циклическом режиме, с достаточной точностью может быть интерпретирован ячеечной

моделью.

Рис.3. Кривые отклика / — / экспериментальные, / - - - / расчетные

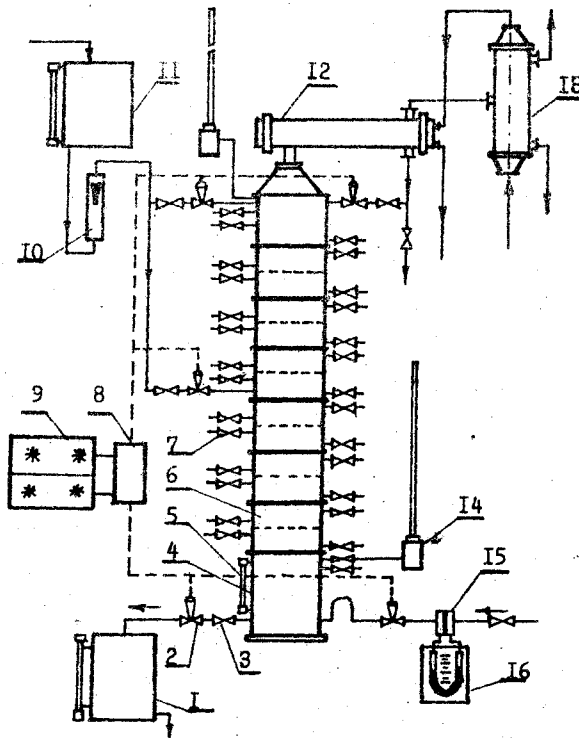


#### 4. Массообмен и эффективность работы колонны с различными типами контактных устройств в циклическом режиме

Исследования эффективности массообменных процессов при циклическом режиме работы проводились в полупромышленной установке /рис.4/ на реальных смесях спиртового производства. Установка включала в себя колонну диаметром 140 мм, снабженную набором сменных контактных устройств в количестве 14 штук. Для обеспечения циклического режима работы на паровой и жидкостных коммуникациях установлены клапаны-отсекатели мгновенного срабатывания. В ходе исследований определялось влияние на основные массообменные характеристики  $K_{Oж}, N_{Oж}, \varrho$  /газо-жидкостной нагрузки, конструктивных особенностей применяемых контактных устройств и продолжительности полупериодов цикла  $\tau_n, \tau_{жс}$ . При обработке результатов эксперимента в качестве косвенной характеристики межфазной поверхности было использовано сопротивление газо-жидкостного слоя  $\Delta P_{г-жс}$ .

Получены аналитические зависимости, отражающие влияние пе-

Рис.4. Схема экспериментальной установки для исследования массообмена



- |                                   |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 1. Сборник кубового остатка       | 9. Командное устройство |
| 2. Пневмоклапан                   | 10. Ротаметр            |
| 4. Кубовая часть                  | 11. Напорная емкость    |
| 5. Уравненное стекло              | 12. Дефлегматор         |
| 6. Кубовая часть                  | 13. Конденсатор         |
| 7. Пробоотборники                 | 14. Вакуум-прерыватель  |
| 8. Блок электромагнитных клапанов | 15. Острая диафрагма    |
|                                   | 16. Дифманометр         |

рассчитанных факторов на кинетику процесса массопередачи в колонне с циклическим режимом работы:

для колпачковых тарелок -

$$\frac{K_{\text{жс}} a}{\Delta P_{\text{г-жс}}} = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot L^{0,68} \cdot \nu^{0,29} \cdot \zeta^{0,58} \cdot \zeta_{\text{жс}}^{0,88} \quad /8/$$

для провальных тарелок -

$$\frac{K_{\text{жс}} a}{\Delta P_{\text{г-жс}}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot L^{0,2} \cdot \nu^{0,3} \cdot \zeta_{\text{жс}}^{0,41} \quad /9/$$

для комбинированных тарелок -

$$\frac{K_{\text{жс}} a}{\Delta P_{\text{г-жс}}} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot L^{0,3} \cdot \nu^{0,12} \cdot \zeta_{\text{жс}}^{0,17} \quad /10/$$

Анализ представленных уравнений свидетельствует, что наибольшей чувствительностью к изменениям продолжительности жидкостного периода обладают контактные устройства колпачкового и провального типов, что вызвано резким увеличением продольного перемешивания в колонне о данными к.у. В аппарате с комбинированными тарелками, как установлено ранее, увеличение  $\zeta_{\text{жс}}$  не сопровождается ростом перемешивания и приводит к увеличению  $\Delta P_{\text{г-жс}}$ . Поскольку одновременно с этим происходит возрастание  $K_{\text{жс}} a$ , влияние  $\zeta_{\text{жс}}$  на комплекс  $K_{\text{жс}} a / \Delta P_{\text{г-жс}}$  для комбинированных тарелок заметно меньше, чем для сравниваемых конструкций.

При выполнении эксперимента массообменные характеристики контактных устройств по высоте колонны фиксировали только для колпачковых тарелок, поэтому параметр  $\zeta$ , отражающий их изменение, входит в состав одного уравнения /8/.

Эффективность массопередачи на тарелках колонны, работающей в циклическом режиме, является функцией целого ряда факторов /конструктивных, гидродинамических, режимных/, специфичных для условий КЦР и не проявляющих своего действия при традиционном ведении процесса.

Математическое выражение, учитывающее влияние данных факторов, полученное на основе уравнения материального баланса по легколетучему компоненту на колпачковой тарелке за время парового периода, имеет вид:

$$\zeta = \frac{H_r (X_n - X_0) + a (X_{n+1} - X_0)}{G (Y_n - Y_{n-1})} \quad /11/$$

где  $a = S \sqrt{\left( \frac{S \cdot L}{2/3 \mu \cdot b \sqrt{2g}} \right)^3}$

Уравнение /II/ описывает влияние на эффективность разделения  $\xi$  газо-жидкостной нагрузки, периодов цикла, а также перебор жидкости на никележаче к.у. во время парового периода.

Экспериментальная проверка полученного уравнения в полупромышленной установке и сравнение опытных и расчетных значений при работе колонны в различных режимах показали достаточно высокую степень совпадения результатов /относительная погрешность не превышает 10%/, что дает основание рекомендовать полученное уравнение для практических расчетов эффективности циклических массообменных процессов.

Среднюю эффективность  $E_0$  колонны в циклическом режиме, являющуюся интегральной характеристикой процесса, рассчитывали исходя из числа теоретических тарелок  $n_T$  с последующим использованием соотношения:

$$E_0 = \frac{n_T}{n_D} \quad /12/$$

Величину  $n_T$  определяли по формуле Фенске для составов дистиллята  $X_D$  и кубового остатка  $X_K$  в условиях безотборного режима.

$$n_T = \frac{\lg \left( \frac{X_D}{1-X_D} \cdot \frac{1-X_K}{X_K} \right)}{\lg \alpha} \quad /13/$$

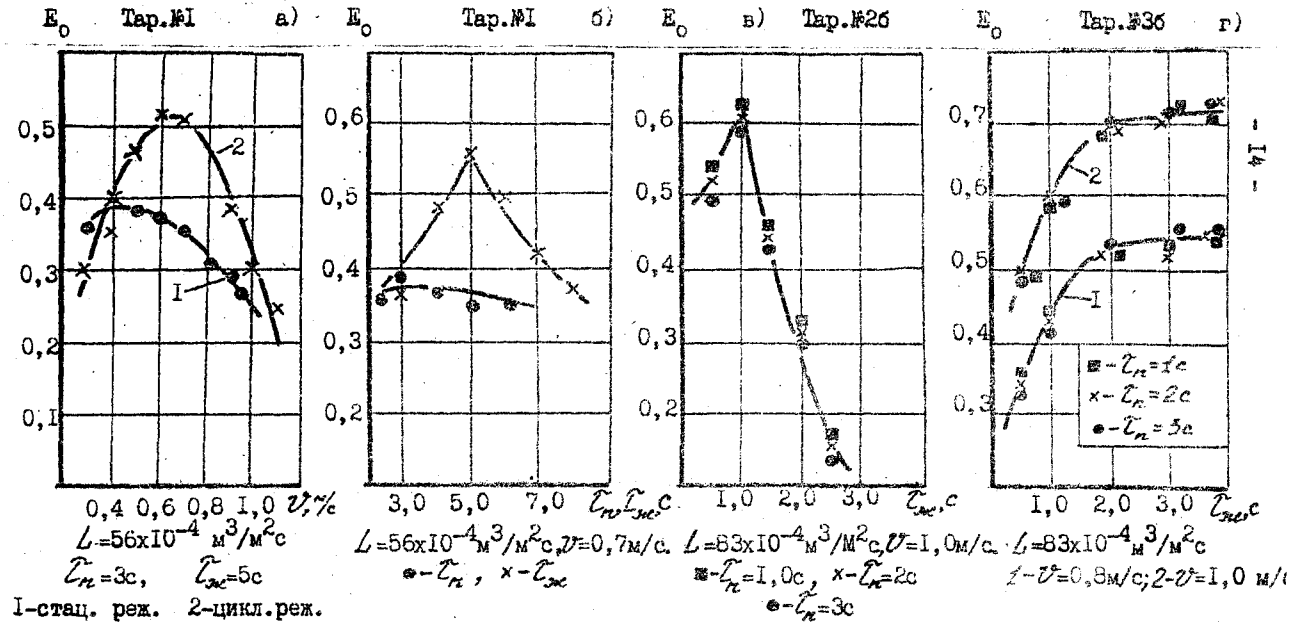
Оптимальные условия работы колонны в циклическом режиме определяли при помощи планирования эксперимента с использованием метода крутого восхождения. Следует отметить, что полученные таким образом значения  $\xi_{opt}$  совпадают с продолжительностью  $\tau_{opt}$ , при которой обеспечивается однократная смена жидкостных задержек на тарелках колонны. Для расчета величины  $\Phi$  была использована зависимость:

$$\Phi = \frac{L''}{H_T} \cdot \tau_{opt} \quad /14/$$

На рис.5 представлены результаты экспериментальных исследований по изменению  $E_0$  при воздействии различных управляющих факторов циклического процесса.

Как следует из рис.5а, перевод колонного аппарата в циклический режим существенно /на 25-30% / повышает эффективность его

Рис.5 Зависимость средней эффективности исследуемых тарелок от продолжительности периодов цикла и скорости пара





работы по сравнению со стационарными условиями. Одновременно с этим расширяется диапазон рабочих скоростей газовой фазы, что приводит к повышению пропускной способности колонны в КЦР.

Результаты эксперимента /рис. 5б, в/ подтверждают экстремальный характер зависимости  $E_0$  колпачковых и провальных к.у. от длительности жидкостного периода и незначительное влияние на указанный параметр времени  $t_n$ . Одинаковый характер зависимости  $E_0$  от  $t_{жс}$  указанных тарелок является свидетельством определяющего влияния на эффективность колонны кратности обмена жидкостной задержки  $\Phi$  для обеих конструкций. При этом весьма высокую чувствительность к соблюдению оптимальной продолжительности  $t_{жс}$  проявляют тарелки провального типа: отклонение  $t_{жс}$  на 0,5с от оптимального значения вызывает понижение эффективности колонны на 20%. Кроме того, незначительная длительность жидкостного периода на провальных тарелках [ $t_{жс} = t_{опт} = 0,5-1,5с$ ] создает напряженный режим работы обеспечивающей аппаратуры и ухудшает ее эксплуатационные характеристики.

Перечисленных выше недостатков лишена комбинированная конструкция к.у., график зависимости  $E_0$  от  $t_{жс}$  которой не имеет экстремумов. При  $t_{жс} = 1,0-1,5$  с. эффективность колонны близка к максимальной и в исследованном диапазоне  $L$  и  $t_{жс}$  остается на максимальном уровне, что является подтверждением стабилизации кратности обмена жидкостной задержки  $\Phi$  на комбинированных тарелках независимо от длительности периода подачи жидкости и плотности орошения. При исследовании эффективности полной ректификационной колонны /флегмовое число  $R = 3,5,7$ / были определены значения  $\Phi$  отдельно для истощающей и укрепляющей части, а затем рассчитана величина  $\Phi$  для всей колонны.

В результате сопоставления  $E_0$  при изменении флегмового числа с одновременным сопоставлением соответствующих значений  $\Phi$  установлено, что  $E_0$  имеет максимальные значения при  $\Phi \approx 1$ .

Анализ полученных данных подтвердил наличие для режима с возвратом флегмы, как и для безотборного режима, оптимальной продолжительности жидкостного периода  $t_{жс}^{opt}$ , обеспечивающего значения  $\Phi \approx 1$ . При  $t_{жс}^{opt}$  разделяющая способность колонн на 20-30% выше аналогичных показателей стационарного режима. Сравнение величины  $E_0$  в циклическом режиме для полной и истощивающей колонны свидетельствует о более высокой эффективности колонны истощения / $E_0 = 55\%$ /.

### 5. Промышленные испытания массообменных аппаратов, работающих в циклическом режиме

Реализация результатов исследования была осуществлена путем перевода в циклический режим колонны укрепления эфирно-альдегидной фракции /ЭАФ/ спиртового отделения ПО "Бобруйскгидролизпром" Главмикробиопрома СССР и сатурационной установки линии производства безалкогольных напитков Ивано-Франковской пицевкусовой фабрики.

Согласно проекту реконструкции, режим работы колонны укрепления ЭАФ диаметром 0,3 м, оснащенной многоколпачковыми тарелками, был изменен посредством установки на продуктовых трубопроводах пневматических клапанов-отсекателей. Управление работой пневмо-клапанов осуществлялось командным устройством, состоящим из двух электронных реле времени и блока электромагнитных клапанов. Укреплению подвергалась головная фракция эфирационной, ректификационной и метанольной колонн. Исследуемая колонна была укомплектована необходимым теплообменным оборудованием и контрольно-измерительной аппаратурой.

В результате промышленных испытаний установлено, что применение циклических режимов в колонне укрепления ЭАФ брагоректификационных установок существенно увеличивает ее производительность за счет расширения диапазона скоростей паровой фазы, улучшает разделение компонентов смеси, поступающей на перегонку, уменьшает потери спирта с концентратом ЭАФ. Перевод действующего оборудования в циклический режим работы способствует также уменьшению затрат пара на ректификацию. Как показали промышленные испытания, при длительности периода подачи пара  $\tau_{\text{п}} = 2,0-3,0\text{с}$ / общая продолжительность цикла 5,0-8,0с/ удельный расход пара на перегонку снижается на 25-30% сравнительно с режимом стационарного противотока при сохранении достаточно высокой разделяющей способности контактных устройств.

Анализ результатов промышленных испытаний показывает, что длительность парового периода в исследованном диапазоне 2,0-5,0с практически не оказывает влияния на степень обогащения конечного продукта, а изменение  $\tau_{\text{п}}$  в интервале 2,0-6,0с приводит к устойчивому росту содержания эфиров и альдегидов в дистилляте во всем диапазоне варьирования. Кроме того, из экспериментальных данных следует, что в результате применения циклических режимов достигнута высокая степень очистки кубового остатка независимо от

содержания эфиров и альдегидов в жидкостном питании.

Экономический эффект от внедрения циклического режима работы колонны укрепления ЭАФ составил 4000р в год без учета экономии пара.

Промышленный образец сатуратора, работающего в управляемом циклическом режиме был установлен в серийной сатурационной установке РЗ-ВСВ-3. Для создания циклического режима работы узла насыщения была спроектирована и изготовлена автоматическая система, обеспечивающая циклическую подачу  $\text{CO}_2$  в зону контакта. Исполнительные механизмы системы установлены на байпасной линии, параллельно газовой магистрали, что позволило исследовать процесс насыщения при работе аппарата в циклическом и стационарном режимах в сопоставимых условиях.

Согласно ГОСТ 6687.3-74 концентрация  $\text{CO}_2$  в газированных безалкогольных напитках должна быть не ниже 0,4%мас. Промышленные испытания показали, что данное содержание двуокси углерода в стационарном режиме колонны достигается при  $P=0,50-0,38$  МПа. Необходимая степень поглощения  $\text{CO}_2$  в циклическом режиме обеспечивается при  $P=0,27-0,29$  МПа, что позволяет снизить расход  $\text{CO}_2$  на сатурацию.

Длительность  $t_n$  изменялась в опытах в диапазоне 0,5-2,0с. с интервалом 0,5с. Из экспериментальных данных следует, что зависимость содержания  $\text{CO}_2$  от  $t_n$  носит экстремальный характер, причем экстремум находится в интервале  $t_n=0,5-1,0$ , что совпадает с результатами исследования воздействия ударной волны газового потока в момент открытия клапана. Эффективность процесса сатурации возрастает при этом на 9-12% по сравнению со стационарным режимом. Перевод действующих узлов сатурации промышленных линий выработки безалкогольных напитков на работу по новому методу не сопровождается существенными материальными и финансовыми затратами. Результаты промышленных испытаний сатуратора непрерывного действия, работающего в циклическом режиме, позволяет рекомендовать данный способ интенсификации массообмена для широкого применения в пиво-безалкогольной промышленности.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в диссертации экспериментальные и теоретические исследования позволили сформулировать методы и принципы интенсификации массообменных процессов в колонных аппаратах спиртового и

безалкогольного производства, работающих в управляемом циклическом режиме. Полученные результаты отражают закономерности массообмена в КЦР, присущие процессам, протекающим в двухфазных /газ /пар/-жидкость/ системах, и могут быть использованы в ряде других отраслей промышленности - нефтехимической, фармацевтической, гидролизной.

#### В ы в о д ы

1. Установлено, что применение циклических режимов работы массообменных аппаратов способствует интенсификации процессов разделения, увеличивая их эффективность и производительность по сравнению с режимом стационарного противотока.

2. Определены коэффициенты гидравлического сопротивления исследуемых к.у. Установлено, что в циклическом режиме, кроме величины газо-жидкостной нагрузки, наибольшим управляющим воздействием на  $\Delta P_{\text{л}}$  и  $\Delta P_{\text{л-ж}}$  обладает продолжительность периода подачи жидкой фазы. Определено, что изменение длительности парового периода в рабочем диапазоне  $\tau_{\text{л}}=1,5-5,0\text{с}$  не влияет на гидродинамические характеристики тарелок.

3. Показано, что использование циклических режимов связано с дополнительным подводом энергии в зону контакта за счет ударного воздействия потока газа в момент открытия клапана на воздуховоде. Установлен вид аналитических зависимостей для расчета гидродинамических характеристик исследованных тарелок в циклическом режиме.

4. Показано, что поочередной ввод фаз в зону контакта существенно изменяет степень перемешивания и структуру потоков в колонне, причем увеличение длительности  $\tau_{\text{л}}$  сопровождается незначительным ростом  $\sigma_{\text{г}}^2$  для всех конструкций контактных устройств, а при изменении длительности  $\tau_{\text{ж}}$  минимум  $\sigma_{\text{г}}^2$  наблюдается для случаев, когда кратность обмена жидкостной задержки на тарелках  $\Phi=1$ .

5. Определено, что значения  $K_{\text{ожс а}}$ ,  $N_{\text{ожс}}$  и  $\tau$  в циклическом и стационарном режимах практически одинаковы для исследуемых тарелок и изменяются в зависимости от плотности орошения  $L$ , скорости пара  $v^*$ , длительности периода подачи жидкости  $\tau_{\text{ж}}$ . Продолжительность  $\tau_{\text{л}}$  на указанные характеристики контактных устройств в рабочем диапазоне практически не оказывает влияния.

6. Установлено, что применение циклических режимов способствует увеличению общей эффективности  $E_0$  колонны на 25-30%, по сравнению со стационарным режимом, при одновременном расширении диапазона устойчивой работы колонны. Диапазон оптимальных скоростей паровой фазы увеличивается на 20-25%. Определено, что эффективность работы исходящих колонн  $E_0$  существенно выше эффективности колонн с укрепляющей частью, что вызвано неодинаковым значением кратности обмена жидкостной задержки  $\Phi$  для обеих частей полной колонны.

7. Показано, что применение циклических режимов в промышленной колонне укрепления ЭАФ улучшает разделяющую способность контактных устройств - содержание эфиров и альдегидов в дистилляте увеличилось по сравнению со стационарным режимом на 9%. Определено, что перевод сагурационной установки для насыщения  $CO_2$  напитков и минеральных вод в КЦР повышает эффективность процесса на 9-12%, при одновременном повышении содержания диоксида углерода до 0,43-0,45 мг/л и понижении рабочего давления в аппарате  $P=0,27-0,29$  МПа/.

Суммарный экономический эффект от внедрения циклического метода интенсификации массообменных процессов составил свыше 5 000 руб. в год.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО  
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Копыленко А.В., Таран В.М. Исследование гидродинамики колпачковых и провальных контактных устройств в режиме с контролируемыми циклами.- Сборник тезисов докладов У Республиканской конференции "Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств".- Днепропетровск, 1980, с.123-125.

2. Таран В.М., Копыленко А.В. О перспективе применения циклических режимов в ректификации.- В сб. "Пищевая промышленность", 1981, вып.27, с.76-79.

3. Копыленко А.В., Таран В.М., Геращенко В.Н. Работа колпачковых контактных устройств в режиме с контролируемыми циклами. - Ферментная и спиртовая промышленность, 1981, №5, с.31-34.

4. Копыленко А.В., Таран В.М. Влияние нестационарных режимов на степень брызгоуноса в колоннах спиртового производства.- Ферментная и спиртовая промышленность, 1982, №3, с.26-28.

5. Копыленко А.В., Таран В.М. Массообменный аппарат для процессов в режиме с контролируемыми циклами.- Положительное решение

по заявке №339791 2/23 - 26.- Приоритет от 18.02.1982.

6. Копыленко А.В., Тарап В.М., Геращенко В.Н., Булдовский А.Н., Малезик И.Ф., Касиянчук В.Д. Об использовании циклических режимов работы сагुरационных установок безалкогольного производства.- Пищевая промышленность.- К.: Техника, 1983, №2, с.49-50.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$L$  - плотность орошения жидкости,  $\text{м}^3/\text{м}^2\text{с}$ ;  $L''$  - объем жидкости, поступающей в колонну за единицу времени,  $\text{м}^3$ ;  $H_r$  - объем жидкости на тарелке /застойная зона/,  $\text{м}^3$ ;  $V_0$  - объем жидкости на тарелке после окончания периода  $\tau_n$ ,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta H$  - объем жидкости, переброшенной в сливное устройство за время  $\tau_n$ ,  $\text{м}^3$ ;  $\Phi$  - кратность вытеснения жидкостной задержки на тарелке;  $R$  - флегмовое число;  $K$  - объем движущейся жидкости,  $\text{м}^3$ ;  $\mu$  - коэффициент расхода жидкости;  $G$  - паровой поток,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $v$  - скорость газа /пара/  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\tau_{\Sigma}$  - общая продолжительность цикла, с;  $\tau_{ж}$  - продолжительность жидкостного периода, с;  $\tau_{п}$  - продолжительность парового периода, с;  $\tau_{оп}$  - время опорожнения тарелки, с;  $t$  - текущее время, с;  $\Delta P_{гж}$  - гидравлическое сопротивление газо-жидкостного слоя,  $\text{н}/\text{м}^2$ ;  $\xi$  - коэффициент местных сопротивлений;  $E$  - брызгоунос,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $X_n$  - концентрация летучего компонента в застойной зоне, % мас.;  $X_{n+1}$  - концентрация летучего компонента в движущейся над застойной зоной жидкости, % мас.;  $X_0$  - концентрация летучего компонента в жидкости после завершения  $\tau_n$ , % мас.;  $X_k$  - концентрация легколетучего компонента в кубовом остатке, % мас.;  $X_d$  - концентрация легколетучего компонента в дистилляте, % мас.;  $y_n^*$  - содержание легколетучего компонента в парах, равновесных со средним составом жидкости, находящейся на  $n$ -й тарелке за время  $\tau_n$ , % мас.;  $y_{n-1}$  - содержание легколетучего компонента в парах, поднимающихся с  $n-1$  тарелки, % мас.;  $\alpha$  - относительная летучесть целевого компонента;  $N_{ож}$  - число единиц переноса в жидкой фазе;  $K_{ож}$  - коэффициент массопередачи,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $Z$  - к.п.д. контактного устройства по Мерффи;  $E_0$  - средняя эффективность колонны;  $n_0$  - число реальных тарелок в колонне;  $\sigma_0^2$  - дисперсия распределения времени пребывания жидкости на каскаде из 5 тарелок;  $S$  - площадь тарелки за вычетом сливного сегмента,  $\text{м}^2$ ;  $S_{об}$  - свободное сечение тарелки, %;  $b$  - ширина сливной перегородки, м;  $i$  - порядковый номер тарелки относительно кубовой части колонны /  $i = 2, 6, 12$  /;  $g$  - ускорение гравитации,  $\text{м}/\text{с}^2$ .