

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 66.02.8

БОРОВИК Андрей Александрович

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДА РАСЧЕТА  
МАССООБМЕННОГО АППАРАТА ДИСПЕРСИОННО-ПЕНОЧНОГО ТИПА

Специальность 05.17.08 - Процессы и аппараты  
химической технологии

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 1998



Работа выполнена в Белорусском государственном технологическом университете.

Научный руководитель

доктор технических наук,  
профессор А. И. ЕРШОВ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор Г. Д. ЛУКЕВИЧ,

кандидат технических наук,  
доцент В. Н. ГУЛЯЕВ.

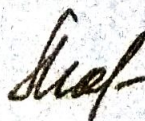
Оппонирующая организация - Гродненский институт азотной промышленности и продуктов органического синтеза.

Защита диссертации состоится " 20 " мая 1998 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании Совета Д 02.08.02 по защите диссертаций в Белорусском государственном университете по адресу: 220630, г. Минск, ул. Свердлова, 13а

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного технологического университета.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1998 г.

Ученый секретарь  
Совета Д 02.08.02 по защите  
диссертаций



В. А. МАРКОВ



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИИ.** В химической и смежных с ней отраслях промышленности при проведении процессов абсорбции и ректификации наряду с колонными теплообменными аппаратами тарельчатого и насадочного типов применяются роторные аппараты. В таких аппаратах образуется развитая поверхность контакта в газо(паро)-жидкостных системах, достигаются высокие значения коэффициентов массопередачи и обеспечивается эффективная сепарация фаз. Однако, в большинстве своем, роторные конструкции требуют установки внешнего привода, что приводит к росту капитальных и энергетических затрат.

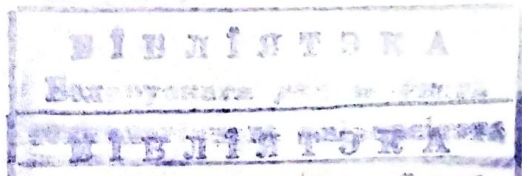
Перспективным техническим решением в данном случае является создание бесприводных аппаратов, в которых для вращения ротора используется энергия газового потока. В этом направлении начаты поисковые исследования и разработки, однако появившиеся конструкции пока не очень совершенны по той причине, что гидродинамика и массообмен бесприводных аппаратов слабо изучены. Поэтому, задача разработки методов расчета и создания новых конструкций роторных бесприводных массообменных аппаратов является весьма актуальной.

**СВЯЗЬ РАБОТЫ С НАУЧНЫМИ ТЕМАМИ.** Работа выполнена в БГТУ в соответствии с планами госбюджетной и хоздоговорной тематики (NN регистрации 01910018335 и 01860023406).

**ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.** Целью настоящей работы является разработка метода расчета роторных бесприводных массообменных аппаратов с получением функциональных зависимостей для определения их технических характеристик, а также научное обоснование создания бесприводного массообменного аппарата, использующего для вращения ротора энергию газовой и жидкой фаз.

В соответствии с поставленной целью решались следующие основные задачи:

1. Теоретический анализ механизма взаимодействия потока газа с преобразователями энергии роторно-диспергирующего устройства в многоступенчатом массообменном аппарате, установление взаимосвязи гидродинамических параметров с конструктивными с последующим научным обоснованием совершенствования таких аппаратов в направлении эффективного использования энергии фазовых потоков для обеспечения развитой по-





верхности контакта и повышения устойчивости работы в условиях применения коррозионных и смолообразующих сред.

2. Экспериментальное исследование структуры потоков в различных сечениях контактной ступени аппарата и частоты вращения ротора с последующей проверкой адекватности опытных и расчетных данных.

3. Экспериментальным методом установление зависимостей гидравлического сопротивления и брызгоуноса на отдельной контактной ступени от скорости потока, плотности орошения, физико-химических свойств газо-жидкостных систем, геометрических размеров и получение функциональных выражений для расчета вышеуказанных параметров.

4. Исследование закономерностей массообмена на контактной ступени в целом и на поверхности пленки отдельно с получением расчетных зависимостей для определения эффективности массопередачи.

5. На основе теоретических и экспериментальных исследований составление рекомендаций по выбору оптимальных режимов проведения процесса и практическому применению дисперсионно-пленочных аппаратов в промышленности.

#### НАУЧНАЯ НОВИЗНА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.

1. В диссертационной работе впервые выполнен теоретический анализ механизма взаимодействия газового потока в бесприводном аппарате с преобразователями энергии и получены уравнения для определения мощности, передаваемой потоком газа ротору, а также решена задача аналитического определения частоты вращения ротора с учетом влияния жидкой фазы.

2. Посредством стробоскопического метода установлена частота вращения ротора с учетом изменения расходных и геометрических параметров, подтвердившая справедливость результатов аналитического определения частоты вращения ротора.

3. Замерены профили скоростей в различных сечениях контактной ступени, позволившие выяснить структуру потока газа и характер взаимодействия фаз в отдельных зонах.

4. Получены функциональные расчетные зависимости для определения гидравлического сопротивления, брызгоуноса и эффективности массопередачи.

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.

1. На основе комплексных исследований создана новая конструкция роторного дисперсионно-пленочного аппарата без



внешнего привода для проведения процессов сепарации, многоступенчатой абсорбции и ректификации с меньшими энергетическими затратами, чем в типовых насадочных и тарельчатых колоннах.

2. Получены расчетные зависимости для определения основных рабочих параметров аппарата.

3. Составлены рекомендации проектировщикам по выбору оптимальных условий работы с применением как обычных жидкостей, так и коррозионных и склонных к смолообразованию.

4. Разработанная конструкция вентилятора-сепаратора, как прототипа роторного дисперсионно-пленочного аппарата, прошла успешные опытно-промышленные испытания при очистке вентвыбросов гранбашни цеха производства карбамида на Северодонецком ПО "Азот" и рекомендована к внедрению.

**ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.** Разработанная конструкция дисперсионно-пленочного массообменного аппарата благодаря низкому гидравлическому сопротивлению и отсутствию привода позволит сократить энергетические и капитальные расходы, а также расширит использование бесприводных аппаратов как в типовых процессах абсорбции и ректификации, так и в случаях применения коррозионно-активных и смолообразующих сред в огне- и пожароопасных производствах.

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ, ВНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:**

- аналитический метод расчета частоты вращения ротора;
- новая конструкция бесприводного роторного дисперсионно-пленочного массообменного аппарата, обеспечивающая эффективный контакт фаз при более низких гидравлических сопротивлениях, чем в типовых насадочных и тарельчатых аппаратах;
- закономерности распределения скоростей газа в различных сечениях ступени контакта и частоты вращения ротора;
- зависимости гидравлического сопротивления и брызгоуноса на контактной ступени от расходных и геометрических параметров, а также вязкости жидкой фазы;
- закономерности массообмена на ступени контакта в целом и на поверхности пленки отдельно;
- программное обеспечение для расчета гидродинамических и массообменных характеристик аппарата.

**ЛИЧНЫЙ ВКЛАД СОИСКАТЕЛЯ.** Монтаж опытной установки, теоретические и экспериментальные исследования выполнены автором, а анализ и обработка полученных результатов осуществле-



ны с участием научного руководителя.

**АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ.** Результаты работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях БГТУ, на научно-технической конференции "Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии" (Гродно, 1994), на 3-й научно-технической конференции стран СНГ "Процессы и оборудование экологических производств" (Волгоград, 1995).

**ОПУБЛИКОВАННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ.** По теме диссертации опубликовано 5 статей, 2 тезисов докладов на научно-технических конференциях, получен патент на изобретение.

**СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав основной части, выводов, списка использованных источников и приложения. Работа изложена на 119 страницах машинописного текста, иллюстрирована 36 рисунками, библиография включает 116 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен обзор конструкций массообменных аппаратов и контактных устройств, использующих энергию потока газа для вращения ротора или диспергирующего устройства. При этом внимание уделялось изучению гидродинамических и массообменных характеристик аппаратов различных конструкций; а также определению затрат мощности на вращение диспергирующих устройств.

Благодаря анализу литературных источников удалось выявить достоинства и недостатки имеющихся конструкций. К числу достоинств следует отнести обеспечение развитой поверхности контакта при диспергировании жидкой фазы на мелкие капли без использования внешнего привода. Вместе с тем установлено, что в каждой контактной ступени преобразователи энергии газового потока (многолопастные колеса, пропеллеры, конуса с лопастями) закреплены и вращаются на индивидуальных осях. При этом в случае применения загрязненных, коррозионно-активных или смолообразующих сред, когда значительно увеличиваются силы трения в подшипниках, крутящего момента, создаваемого одним преобразователем энергии, безусловно окажется недостаточно для вращения диспергирующего элемента, что приведет к нарушению работы аппарата в целом. Серьезным упущением является и то, что для сообщения вращения ротору не ис-



пользуется энергия движущейся жидкости.

Исходя из выявленных недостатков, нами разработана усо-

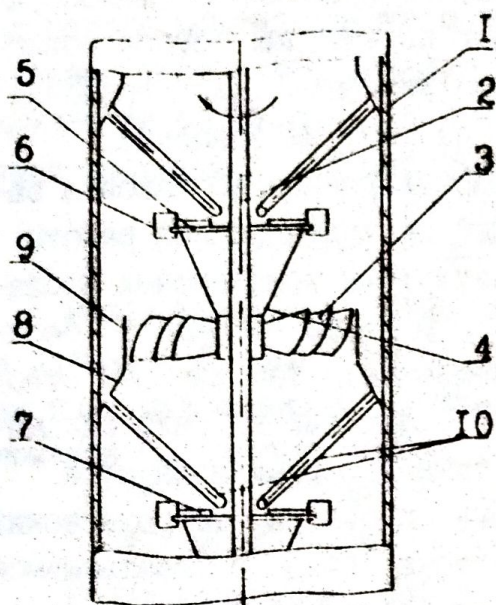


Рис.1. Роторный дисперсионно-пленочный массообменный аппарат. 1 - корпус; 2 - вал; 3 - вентиляторное колесо; 4 - опорный конус; 5 - диспергирующий диск; 6 - вертикальные диспергирующие лопатки; 7 - разгонные лопатки; 8 - сливной конус; 9 - газовый патрубок; 10 - Г-образные переливные трубки

вершенствованная конструкция роторного бесприводного дисперсионно-пленочного массообменного аппарата, схема которого представлена на рис.1. Он содержит вертикальный цилиндрический корпус 1, общий вал 2, размещенный по оси аппарата, контактные ступени, каждая из которых включает вентиляторное колесо 3, опорный конус 4, диспергирующий диск 5 с вертикальными лопатками 6 и разгонными лопатками 7, сливной конус 8, переходящий в газовый патрубок 9 и переливное устройство, выполненное в виде переливных Г-образных трубок 10, нижние концы которых отогнуты по ходу вращения диспергатора.

При работе аппарата восходящий поток газа на входе в газовые патрубки 9 на каждой ступени воздействует на лопатки вентиляторных колес 3, вызывая вращение общего вала 2 с диспергирующими дисками 5. Под действием статического напора в сливных конусах 8 жидкость по переливным Г-образным трубкам 10 сливается на диспергирующие диски 5 по ходу их вращения, где ей сообщается дополнительная энергия вращательного движения. В результате возникновения и действия центробежных сил жидкая фаза диспергируется и перемещается к стенке аппарата с образованием на ней пленки, стекающей в сливной конус 8, откуда по переливным Г-образным трубкам 10 попадает на нижележащую ступень контакта. Взаимодействие фаз осуществляется в результате контакта капель и струй жидкости с газом в пространстве между дисками 5 и стенкой корпуса 1, а также между пленкой жидкости на стенке корпуса 1 и закрученным газовым потоком.

Наличие общего вала, проходящего через каждую ступень



контакта, позволяет суммировать крутящий момент всех вентиляторных колес и получить усилие, достаточное для преодоления трения в подшипниках даже в случае применения смолообразующих сред. Применение Г-образных переливных трубок позволяет использовать энергию движения жидкости для вращения диспергирующих дисков и увеличить частоту их вращения.

В заключении первой главы сформулирована постановка задачи научных исследований настоящей диссертационной работы.

Во второй главе приведены результаты комплексных исследований частоты вращения ротора и структуры потоков в беспроводном роторном массообменном аппарате, так как они относятся к числу важнейших параметров, влияющих на гидродинамические и массообменные характеристики роторных аппаратов.

На первоначальном этапе нами проведен теоретический анализ механизма взаимодействия потока газа с вращающимся вентиляторным колесом. С этой целью была рассмотрена плоскость вращения вентиляторного колеса (рис.2) и установлено, что вектор полной скорости газа  $W_1$  изменяется по радиусу лопаток и равен сумме векторов осевой  $V_1$  и окружной  $U_1$  составляющих. Имея информацию о распределении вектора  $W_1$ , можно определить осевую и окружную силы давления газа и, проинтегрировав по радиусу лопаток, определить мощность от действия этих сил.

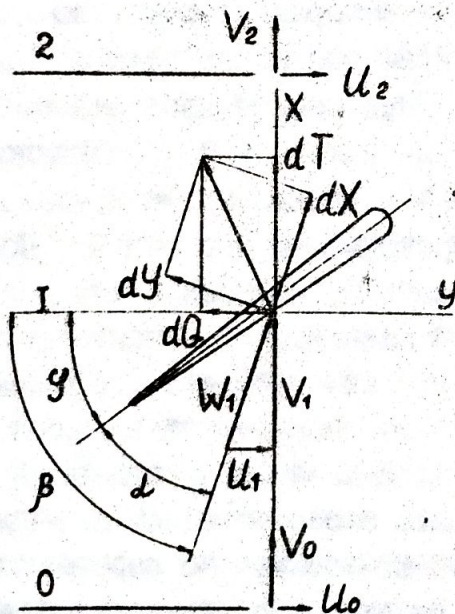


Рис.2. Профиль скоростей газа и сил, действующих на лопасть вентиляторного колеса

Так как закон изменения скорости  $W_1$  неизвестен, решение нами выполнено с применением теории элементарных струй, позволяющей соединить результаты импульсной теории идеального ветроколеса и теории профиля сил, действующих на ветроколесо. На рис.2 представлены три сечения газового потока: 0 - перед вентиляторным колесом, 1 - в плоскости вентиляторного колеса, 2 - после вентиляторного колеса. Соответственно, осевые и окружные скорости в этих плоскостях будут  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ .

Так как закон изменения скорости  $W_1$  неизвестен, решение нами выполнено с применением теории элементарных струй, позволяющей соединить результаты импульсной теории идеального ветроколеса и теории профиля сил, действующих на ветроколесо. На рис.2 представлены три сечения газового потока: 0 - перед вентиляторным колесом, 1 - в плоскости вентиляторного колеса, 2 - после вентиляторного колеса. Соответственно, осевые и окружные скорости в этих плоскостях будут  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ .



$U_0, U_1, U_2$ , а их приращения (индуктивные скорости) по отношению к  $V_0$  и  $U_0 - V_{1i}, V_{2i}, U_{1i}, U_{2i}$ . Для элементарного кольцевого объема газового потока, заключенного между двумя трубками тока и рассекающего диск ветроколеса радиуса  $R_{\delta k}$  по окружности радиуса  $\bar{z}$  и толщиной  $d\bar{z}$  запишем законы сохранения импульса и момента импульса:

$$dT = 2 \cdot \pi \cdot \bar{z} \cdot d\bar{z} \cdot g_r \cdot (V_0 - V_{1i}) \cdot V_{2i} \quad (1)$$

$$dM = 2 \cdot \pi \cdot \bar{z} \cdot d\bar{z} \cdot g_r \cdot (V_0 - V_{1i}) \cdot U_{2i} \cdot \bar{z} \quad (2)$$

Рассмотрим также силы  $dX$  и  $dY$  (рис.2), действующие на элементы лопаток при их движении внутри кольцевого объема. Действия указанных сил приводят к возникновению осевой  $dT$  и окружной  $dQ$  составляющих, а также вращательного момента  $dM$

$$dT = L_n \cdot (C_y \cdot \cos\beta + C_x \cdot \sin\beta) \cdot g_r \cdot W_1^2 / 2 \cdot b_n \cdot d\bar{z} \quad (3)$$

$$dM = L_n \cdot (C_y \cdot \sin\beta - C_x \cdot \cos\beta) \cdot g_r \cdot W_1^2 / 2 \cdot b_n \cdot d\bar{z} \cdot \bar{z} \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (1)-(4) получим соотношения для определения индуктивных скоростей

$$\bar{V}_{1i} / (1 - \bar{V}_{1i}) = \delta \cdot C_n / (8 \cdot \bar{z} \cdot \sin^2\beta) \quad (5)$$

$$\bar{U}_{1i} / (\bar{z} \cdot \bar{\omega} + \bar{U}_{1i}) = \delta \cdot C_t / (8 \cdot \bar{z} \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta) \quad (6)$$

где  $C_n = C_y \cdot \cos\beta + C_x \cdot \sin\beta$

$$C_t = C_y \cdot \sin\beta - C_x \cdot \cos\beta$$

$\bar{z} = (\omega \cdot R_{\delta k}) / V_0$  - быстроходность ветроколеса;

$\delta = (L_n \cdot b_n) / (\pi \cdot R_{\delta k})$  - конструктивный коэффициент.

Уравнения (5), (6) в отличие от уравнений, полученных на основании теории элементарных струй, учитывают влияние окружной составляющей скорости газа  $U_0$ .

В свою очередь, используя соотношения (5) и (6), можно определить мощность, передаваемую потоком газа вентиляторному колесу:

$$P_{\delta k} = \pi \cdot R_{\delta k}^3 \cdot g_r \cdot \frac{V_0^2}{2} \cdot 8 \cdot \int_{\bar{z}}^1 (1 - \bar{V}_{1i}) \cdot \bar{U}_{1i} \cdot \bar{z}^2 \cdot d\bar{z} \cdot \omega \quad (7)$$

Разработанная методика для определения мощности  $P_{\delta k}$  позволила перейти к решению задачи нахождения частоты вращения ротора в орошаемом аппарате, выполненному нами на основе баланса мощностей:

$$n_c \cdot P_{\delta k} = P_p \quad (8)$$

Рассеиваемая мощность  $P_p$  передается жидкой фазе и идет на сообщение ей кинетической энергии, теряется на трение при движении жидкости по диспергирующим дискам, затрачивается на преодоление сил трения в подшипниках, а также при трении



вращающихся вертикальных лопаток диска о газовый поток.

Превалирующая доля мощности  $P_p$  передается жидкой фазе и теряется на трение в подшипниках. Переданную жидкости мощность можно определить с помощью зависимости

$$P_{жс} = G_{жс} \cdot ((\omega \cdot R_p)^2 + U_p^2) / 2 \cdot \eta_c \quad (9)$$

а мощность, теряемую на трение в подшипниках, по уравнению

$$P_n = 2 \cdot \xi_1 \cdot S_n \cdot \tau_{тп} \cdot \omega \quad (10)$$

Ввиду того, что данная методика требует большого количества вычислений, решение оказалось возможным с применением ЭВМ по специально разработанному нами итерационному алгоритму, приложенному в диссертации.

Для того, чтобы воспользоваться аналитическим методом расчета частоты вращения, необходимо иметь информацию о распределении скоростей потока газа в плоскости перед вентиляторным колесом. Кроме того, знание структуры потоков в контактной зоне всегда способствует объяснению механизма явлений при анализе результатов по брызгоуносу и эффективности массообмена.

С этой целью нами проведены экспериментальные исследования профилей скоростей газа с помощью многоканального зонда в 3-х сечениях контактной ступени, которые показали, что из-за возникновения после вентиляторного колеса окружной составляющей скорости наблюдается перераспределение массы восходящего по ступени контакта газа от центра к пристеночным областям.

С целью проверки адекватности разработанной математической методики реальному процессу и получения дополнительно эмпирических зависимостей были проведены экспериментальные исследования частоты вращения ротора. Из апробированных способов измерения частоты вращения нами принят стробоскопический метод, не влияющий на достоверность результатов. Исследования проводились на установке, схема которой показана на рис.3. При этом плотность орошения изменялась в пределах 0,5 - 2,5 кг/(с·м<sup>2</sup>), скорость газа на сечение аппарата от 1 до 3,5 м/с. В качестве жидкости использовались растворы глицерина в воде, газа - воздух. Условия масштабного перехода изучались на 2-х моделях аппарата с диаметрами корпуса 145 мм и 240 мм.

Результаты исследований представлены на рис.4, согласно которым частота вращения существенно зависит от скорости га-



зового потока и плотности орошения. С ростом газовых нагрузок увеличивается динамическое давление газа на лопатки вентиляторного колеса, возрастает крутящий момент на валу и угловая скорость вращения ротора, а, значит, улучшается и диспергирование жидкости. С ростом же плотности орошения возрастает инерция ротора, что приводит к заметному снижению частоты вращения. Необходимо обратить внимание на то, что

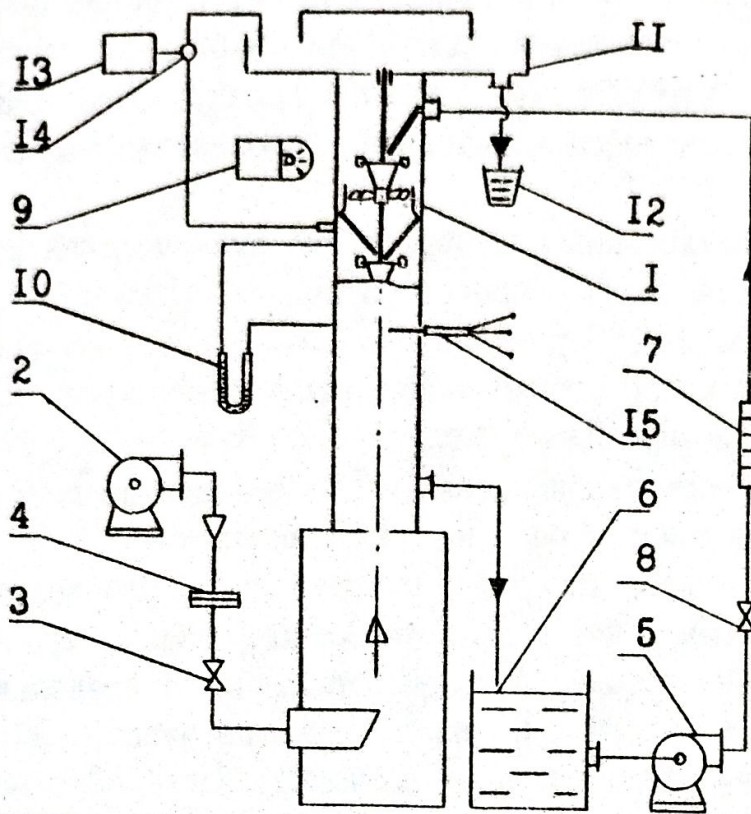


Рис. 3. Схема экспериментальной установки. 1 - дисперсионно-пленочный аппарат; 2 - газодувка с воздухопроводами; 3 - задвижка; 4 - диафрагма; 5 - насос с трубопроводами; 6 - бак; 7 - ротаметр; 8 - кран; 9 - стробоскоп; 10 - микроманометр; 11 - объемный сепаратор; 12 - мерный стакан; 13 - влагомер; 14 - переключатель; 15 - многоканальный зонд

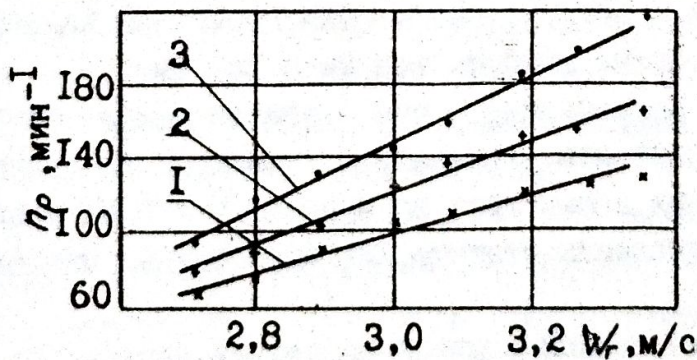


Рис. 4. Зависимость числа оборотов ротора от скорости газа. 1 -  $\rho_g = 1,8 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ ; 2 - 0,88; 3 - 0,5.  $\mu_{ж} = 1 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ ;  $D_d = 145 \text{ мм}$

при  $W_r$  до 2,5 м/с на сечение увеличение линейных размеров способствует росту частоты вращения и расширению диапазона устойчивой работы аппарата. Данный эффект достигается за счет более развитой площади поверхности лопаток вентиляторного колеса, а значит, силы давления газового потока и плеча ее действия. Кроме того приме-

нение Г-образных переливных трубок, нижние концы которых ориентированы по ходу вращения диспергирующих дисков, позво-



ляет увеличить частоту вращения от 7 до 15 % по сравнению с прямыми переливными трубками обычных конструкций.

При сравнительной оценке теоретических и экспериментальных результатов отклонение расчетных и опытных данных не превышало 35 %, что свидетельствует о правильности разработанной нами аналитической методики определения частоты вращения ротора.

На основе исследований получена также эмпирическая зависимость для расчета числа оборотов ротора.

$$n_p = \exp(2,59) \cdot W_r^3 \cdot q_f^{-0,37} \cdot \sqrt{\mu}^{-0,02} \cdot D_A^{0,66} \quad (11)$$

Среднее квадратичное отклонение экспериментальных и расчетных значений не превышает 7 %.

Третья глава диссертации посвящена исследованиям гидродинамических характеристик бесприводного аппарата.

Как известно, гидравлическое сопротивление определяет энергозатраты на перемещение газа в колонных аппаратах, а брызгоунос жидкости газовым потоком ограничивает предельно допустимые газовые нагрузки. Поэтому, одним из этапов нашей работы явилось исследование влияния расходных и геометрических параметров на гидравлическое сопротивление контактной ступени и брызгоунос жидкости, получение расчетных зависимостей, связывающих указанные параметры.

Опыты проводились на установке, схема которой показана на рис.3. При этом плотность орошения изменялась в пределах от 0,2 до 3 кг/(с·м<sup>2</sup>), скорость газа на сечение аппарата от 2 до 4 м/с. В качестве жидкости использовался раствор глицерина в воде, а газа - воздух. Опыты были проведены на моделях аппарата с диаметрами корпуса 145 мм и 240 мм.

Исследованиями установлено, что гидравлическое сопротивление ступени контакта аппарата в указанных диапазонах варьирования расходных параметров не превышает 130 Па и значительно ниже сопротивления статических барботажных массообменных тарелок.

Результаты исследований влияния расходных параметров на брызгоунос представлены на рис.5. Согласно приведенным графикам, величина относительного брызгоуноса возрастает с повышением газовых нагрузок, что связано с увеличением сил динамического воздействия газа на жидкость и уменьшением размеров образующихся капель. С повышением же плотности орошения величина относительного брызгоуноса снижается, что можно



объяснить прежде всего замедлением вращения ротора и диспергированием жидкости на крупные капли.

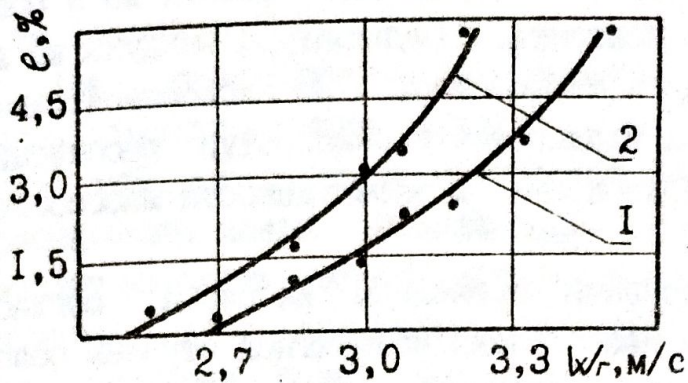


Рис. 5. Зависимость величины относительного брызгоуноса от скорости газа.  
 1 -  $\rho_f = 1,5 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ; 2 - 0,4.  
 $\nu_{ж} = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ;  $D_A = 145 \text{ мм}$

Увеличение вязкости жидкости также способствует снижению брызгоуноса, что обусловлено действием сил вязкостного трения, приводящим к росту размеров образующихся капель.

Увеличение линейных размеров моделей приводит к некоторому

росту относительного брызгоуноса. Данный эффект связан с увеличением окружных скоростей вращения дисков и времени динамического контакта движущихся к стенке аппарата капель жидкости и газового потока.

В результате аппроксимации опытных данных получены эмпирические зависимости для расчета относительного брызгоуноса:

$$e = \exp(-14,5) \cdot W_r^{11,3} \cdot \rho_f^{-0,25} \cdot \nu_{ж}^{-0,53} \cdot D_A^{0,49} \quad (12)$$

и гидравлического сопротивления

$$\Delta P = \exp(1,8) \cdot W_r^{1,79} \cdot \rho_f^{0,32} \cdot D_A^{-0,2} \quad (13)$$

Средние квадратичные отклонения расчетных и экспериментальных данных не превышают 10 %.

В четвертой главе приведены результаты исследования массообменных характеристик ступени контакта и дан их анализ.

С учетом характера взаимодействия фаз внутри аппарата выделены 4 условные зоны массообмена на каждой ступени контакта: 1-я зона находится над поверхностью диспергирующего диска; 2-я зона расположена в области диспергирующих лопаток; 3-я занимает свободное пространство между корпусом аппарата и диспергирующими лопатками; 4-я - у внутренней поверхности стенки аппарата. Принимая во внимание результаты исследований полей скоростей потока газа, дана оценка массообмена в этих зонах.

При исследовании массообменных характеристик аппарата нами использована методика, основанная на адиабатическом испарении воды в воздушный поток. Эксперименты проводились на



установке, схема которой представлена на рис.3. Относительная влажность воздуха измерялась гигрометром "Волна 1М", к датчику которого попеременно подавался воздух до и после поступления на ступень контакта. Температура воздуха на линии подачи фиксировалась термометром. По экспериментальным значениям относительных влажностей и температур рассчитывались величины влагосодержаний и эффективности массообмена по известным формулам.

Результаты исследований приведены на рис.6, согласно которому эффективность массообмена контактной ступени сопоставима с КПД статических контактных тарелок и составляет

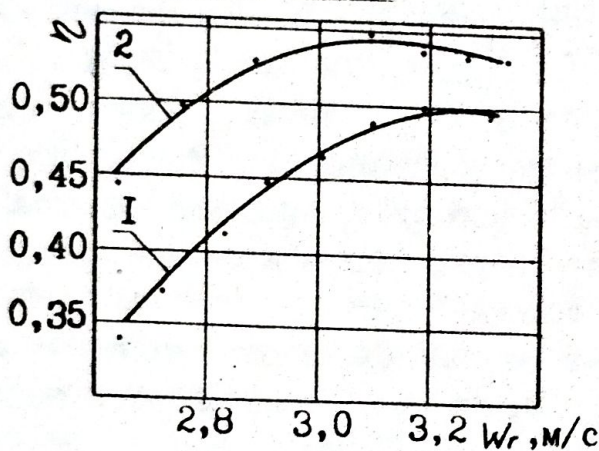


Рис.6. Зависимость эффективности массообмена от скорости газа для различных диаметров аппарата. 1 - D<sub>а</sub> - 145 мм; 2 - 240 мм;  $\nu_{ж} = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ;  $\rho = 0,6 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$

0,4-0,55 в рабочих диапазонах фазовых нагрузок. Причем при скоростях газа 3-3,3 м/с на сечение аппарата эффективность массообмена достигает максимальных значений, что объясняется интенсивным дроблением жидкости и усиленной турбулизацией фаз во 2-ой и 3-ей зонах массообмена. Кроме того, благодаря увеличению энергии диспергируемой жидкости, интенсифицируются процессы переноса в верхней части 4-ой зоны при контакте газа с разрушающимися о стенку каплями.

Возрастание нагрузок по газу свыше 3,2 м/с приводит к замедлению скорости роста эффективности массообмена, что связано с сокращением времени пребывания газа в контактной зоне и повышенным брызгоуносом.

С ростом плотности орошения наблюдается падение эффективности массообмена, что можно объяснить прежде всего ухудшением диспергирования жидкости, а, следовательно, и уменьшением поверхности контакта во 2-ой, 3-ей и 4-ой зонах взаимодействия фаз. Увеличение же линейных размеров аппарата приводит к росту эффективности массообмена (рис.6), что связано с повышением окружных скоростей вращения диспергируемой жидкости и удлинением траекторий движения капель.

Результаты исследований аппроксимированы расчетной за-



зависимостью:

$$\eta = \exp(-1,78) \cdot W_r^{1,18} \cdot q_f^{-0,974} \cdot D_A^{0,22} \quad (14)$$

Разница между рассчитанными и экспериментальными данными не превышает 7 %.

Для интенсификации массообмена рекомендовано устанавливать диспергирующие лопатки под наклоном к плоскости диска, либо использовать конусообразные диспергирующие диски с расширением вверх. Предлагаемые конструктивные изменения позволяют улучшить эффективность массообмена по следующим причинам: 1) в результате отклонения траекторий движения капли жидкости будут достигать стенки аппарата на более высоком уровне, увеличивая поверхность образующейся пленки; 2) вследствие удлинения траекторий полета капель возрастает и время пребывания жидкости в зоне контакта.

На заключительном этапе нашей работы на специально изготовленной модели были проведены исследования массообмена между стекающей пленкой жидкости и восходящим газовым потоком. Полученные результаты позволили оценить долю пленочной (4-я зона) и дисперсной (2-я и 3-я зоны) областей в общем балансе переданной массы. Установлено, что при скоростях газа до 2,5 м/с превалирует массообмен между пленкой и газом. При скорости газа свыше 2,5 м/с, вследствие более интенсивного дробления жидкости, доля вещества, перенесенного через поверхность пленки становится меньше 0,4.

При сопоставлении и обобщении экспериментальных данных из условия обеспечения устойчивой работы аппарата при наибольших КПД контактной ступени установлены диапазоны изменения газовых нагрузок и плотности орошения.

Рекомендуемые режимы работы роторного бесприводного массообменного аппарата

Плотность орошения, кг/(с·м <sup>2</sup> )	Рекомендуемая скорость газа, м/с	Гидравлическое сопротивление ступени контакта, Па	КПД контактной ступени
> 2	3,2-3,5	90-130	0,38-0,48
1,3-2	3,1-3,4	75-105	0,40-0,50
0,6-1,3	3,0-3,3	50-85	0,42-0,54
< 0,6	2,5-3,2	35-65	0,30-0,57



ВЫВОДЫ

1. Отличительной особенностью исследуемого массообменного аппарата для проведения процессов абсорбции, ректификации, сепарации и др. является наличие в нем роторного устройства, использующего для вращения энергию фазовых потоков и обеспечивающего устойчивое взаимодействие газо(паро)-жидкостных систем в интенсивном дисперсионно-пленочном режиме.

2. Теоретический анализ механизма взаимодействия газового потока в аппарате с вентиляторным колесом на валу ротора позволил получить расчетное уравнение (7) для определения мощности, передаваемой ротору на каждой ступени контакта, и на основании принципа баланса мощностей впервые решить задачу определения частоты его вращения в орошаемом аппарате на ЭВМ по специально разработанному итерационному алгоритму. Сравнительная оценка расчетных значений частоты вращения и опытных данных, полученных стробоскопическим методом, показала удовлетворительную сходимость результатов и тем самым подтвердила справедливость математического моделирования.

3. Экспериментально установлено, что при скоростях газа до 3,2 м/с на сечение аппарата относительный брызгоунос не превышает 8 %, и это свидетельствует о повышенной пропускной способности нового аппарата по сравнению с колонными аппаратами тарельчатого и насадочного типа.

4. Исследования на моделях с различными линейными размерами в широком диапазоне изменений расхода фаз показали, что гидравлическое сопротивление контактной ступени не превышает 130 Па при максимальных нагрузках и значительно ниже сопротивления типовых контактных тарелок. Данный фактор позволяет использовать такие аппараты при проведении процессов ректификации даже под вакуумом, а процессов абсорбции и сепарации на установках с низкими и средними напорами газа.

5. Установлено, что эффективность массообмена отдельной ступени контакта роторного аппарата соизмерима с КПД барботажных тарелок при меньших энергетических затратах, причем при скоростях газа до 2,5 м/с на сечение аппарата доля переносимого вещества в пленке преобладает над долей массопереноса в каплях, а при скоростях свыше 2,5 м/с наоборот.

6. В результате обработки экспериментальных данных на ЭВМ получены функциональные зависимости для расчета основных



рабочих характеристик: величины относительного брызгоуноса (12), гидравлического сопротивления контактной ступени (13) и эффективности массообмена (14). Полученные зависимости можно использовать при расчете бесприводных аппаратов для проведения массообменных процессов в газо(паро)жидкостных системах с физико-химическими свойствами близкими к применяемым при исследованиях.

7. Исследованиями профилей скоростей газа в характерных сечениях контактной ступени установлено, что в зоне фазового взаимодействия происходит перераспределение массы восходящего газового потока от оси к периферии аппарата. Поэтому для интенсификации фазового массообмена предложено диспергирующий диск выполнять коническим с расширением вверх, а для обеспечения более полной передачи энергии газового потока ротору кольцевой зазор между вентиляторным колесом и газовым патрубком рекомендовано принимать при проектировании минимально возможным.

8. Испытания опытного образца при мокрой очистке отходящих из гранбашни газов производства карбамида на Северодонецком ПО "Азот" позволили значительно снизить выброс карбамида в атмосферу и материальные затраты на гидролиз, тем самым подтвердив перспективность применения таких аппаратов в промышленности.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$b_l$  - ширина лопасти вентиляторного колеса, м;  $C_y, C_x$  - аэродинамические коэффициенты;  $D_A$  - диаметр аппарата, м;  $\epsilon$  - относительный брызгоунос, %;  $G_{ж}$  - массовый расход жидкости, кг/с;  $L_l$  - число лопаток;  $N_c$  - число ступеней контакта;  $N_p$  - число оборотов ротора, мин<sup>-1</sup>;  $\Delta P$  - потери давления, Па;  $q$  - массовая плотность орошения, кг/(с·м<sup>2</sup>);  $r_{тл}$  - радиус трения, м;  $R_p$  - радиус диспергатора, м;  $\bar{r}$  - относительный радиус;  $S_n$  - нагрузка на подшипник, Н;  $\bar{v}_{гi}$  - относительные индуктивные скорости газа;  $U_p$  - радиальная скорость жидкости, м/с;  $W_r$  - средняя скорость газа, м/с;  $\eta$  - эффективность массообмена;  $\mu_{ж}$  - динамическая вязкость жидкости, Па·с;  $\xi_1$  - коэффициент трения;  $\rho_r$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  - частота вращения, с<sup>-1</sup>.



ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РАБОТЕ

1. Боровик А.А., Ершов А.И. Исследование рабочих характеристик роторного дисперсионно-пленочного массообменного аппарата // Труды БГТУ. Вып.2. Химия и технология неорганических веществ. Серия Ш. - Мн., 1994. - С. 83-88.

2. Исследование работы энергоэкономичных и безопасных конструкций роторных массообменных аппаратов / А.И.Ершов, А.А.Боровик // Тез. докл. научно-технической конференции "Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии" - Гродно: 1994. - С. 178-179.

3. Боровик А.А., Ершов А.И. Исследование полей скоростей газового потока в роторном дисперсионно-пленочном массообменном аппарате // Труды / БГТУ. Вып. 3. Химия и химическая технология. Сер. Ш. - Мн., 1996. - С.76-80.

4. Боровик А.А. Исследование влияния конструктивных параметров на рабочие характеристики роторного бесприводного массообменного аппарата // Труды / БГТУ. Вып. 4. Химия и химическая технология. Сер. Ш. - Мн., 1996. - С.66-69.

5. Боровик А.А., Ершов А.И. Разработка математических методов расчета частоты вращения ротора бесприводного дисперсионно-пленочного массообменного аппарата // Труды / БГТУ. Вып.4. Химия и химическая технология. Сер. Ш. - Мн., 1996. - С.62-66.

6. Ершов А.И., Боровик А.А. Исследование массообмена на поверхности пленки в аппарате роторного типа // Труды / БГТУ. Вып.5. Химия и химическая технология. Сер. Ш. - Мн., 1997. - С.95-98.

7. Пат. N 1879 РВ, В 01 В 3/30. Роторный дисперсионно-пленочный массообменный аппарат / А.И.Ершов, А.А.Боровик, В.А.Марков (РВ). - 1990; Заявлено 23.12.93; Опубл.15.05.97 г. - 3 с.



РЭЗЮМЕ

Баравік Андрэй Аляксандравіч

"Распрацоўка канструкцыі і метада разліку масаабменнага апарата дысперсійна-плеўкавага тыпу"

Масаабмен, ротар, хуткасць, лопатка, сіла, магутнасць, сепарацыя, вынас, супраціўленне, эфектыўнасць, дыспергаванне, фаза, кропля, плеўка

Мэта працы: распрацоўка метада разліку ротарных беспрывадных масаабменных апаратаў з атрыманнем залежнасцяў для ўстанаўлення іх тэхнічных характарыстык, а таксама навуковае абгрунтаванне стварэння масаабменнага апарата, які выкарыстоўвае для вярчэння ротара энергію фазавых патокаў.

У выніку праведзенай працы створана на ўзроўні вынаходкі новая канструкцыя ротарнага беспрываднага масаабменнага апарата з палепшанымі тэхніка-эканамічнымі характарыстыкамі. Распрацавана аналітычная методка разліку частаты вярчэння ротара ў беспрывадным масаабменным апарате; эксперыментальна даследаваны профілі хуткасцяў газавага патоку ў розных сечывах кантактнай ступені і частаты вярчэння ротара; атрыманы эмпірычныя залежнасці для разліку пырскавыносу, гідраўлічнага супраціўлення і эфектыўнасці масаабмену ў залежнасці ад выдатковых і канструктыўных параметраў.

Распрацаваная канструкцыя дзякуючы нізкаму гідраўлічнаму супраціўленню і адсутнасці прывада дазволіць скараціць капітальныя і энергетычныя выдаткі і пашырыць выкарыстанне беспрывадных апаратаў у працэсах абсорбцыі і рэктыфікацыі ва ўмовах выкарыстання забруджаных і смолаўтваральных асяроддзяў.

РЕЗЮМЕ

Боровик Андрей Александрович

"Разработка конструкции и метода расчета массообменного аппарата дисперсионно-пленочного типа"

Массообмен, ротор, скорость, лопатка, сила, мощность, сепарация, унос, сопротивление, эффективность, диспергирование, фаза, капля, пленка.

Цель работы: разработка метода расчета роторных беспрывадных массообменных аппаратов с получением зависимостей для



определения их технических характеристик, а также научное обоснование создания массообменного аппарата, использующего для вращения ротора энергию фазовых потоков.

В результате проведенной работы создана на уровне изобретения новая конструкция роторного бесприводного массообменного аппарата с улучшенными технико-экономическими характеристиками. Разработана аналитическая методика расчета частоты вращения ротора в бесприводном массообменном аппарате; экспериментально исследованы профили скоростей газового потока в различных сечениях контактной ступени и частота вращения ротора; получены эмпирические зависимости для расчета брызгоуноса, гидравлического сопротивления и эффективности массообмена в зависимости от расходных и конструктивных параметров.

Разработанная конструкция благодаря низкому гидравлическому сопротивлению и отсутствию привода позволит сократить капитальные и энергетические расходы и расширит использование бесприводных аппаратов в процессах абсорбции и ректификации в условиях применения загрязненных и смолообразующих сред.

#### SUMMARY

Andrei Alexandrovich Borovik

"Design and calculation methods of a mass-transfer apparatus of a dispersive-film type"

Mass-transfer, rotor, velocity, blade, power, capacity, separation, ablation, resistance, effectiveness, dispersion, phase, drop, film.

Aim of work: to work out a calculation method of non-drive mass-transfer apparatuses and obtain dependence to determine their technical parameters; to give scientific substantiation of a mass-transfer apparatus in which the rotor is revolved by gas and fluid phases energy.

As a result of the conducted work a new design of a rotor non-driving mass-transfer apparatus with improved technical-economic characteristics has been invented an analytical method of calculation of rotation frequency of a rotor



In non-driving mass-transfer apparatus has been worked out, profiles of velocities of a gas current in different section of a contact degree and rotation frequency of a rotor have been experimentally investigated, empirical dependences for calculation of splash-ablation, hydraulic resistance and effectiveness of mass transfer depending on the parameters of consumption and construction have been obtained.

The worked out non-driving construction with low hydraulic resistance will allow to reduce capital and energy expenses and enlarge the utilization of non-driving apparatus in the process of absorption and rectification in the polluted and resinificational environments.

A handwritten signature or set of initials, possibly 'JL', written in black ink. The signature is stylized and cursive, with a large loop at the bottom.



**БОРОВИК АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДА РАСЧЕТА  
МАССООБМЕННОГО АППАРАТА ДИСПЕРСИОННО-ПЛЕНОЧНОГО ТИПА**

Подписано в печать 31.03.98. Формат 60x90 1/16. Печать офсет-  
ная. Усл.печ.л. 1,3. Усл.кр.-отт. 1,3. Уч.-изд.л. 1,1.

Тираж 70 экз. Заказ 181.

**Белорусский государственный технологический  
университет**

220630, Минск, Свердлова, 13а.

Отпечатано на роталпринте Белорусского государственного  
технологического университета.

220630, Минск, Свердлова, 13.