

66  
X85

БЕЛОРУССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.М.КИРОВА

66.02

На правах рукописи

ХОТИН Леонид Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ОДНО- И ДВУХФАЗНОГО  
ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА В ТРУБАХ И КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Специальность 05.17.08 -- процессы и аппараты  
химической технологии

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

Минск 1980

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Белорусском технологическом институте имени С.М.Кирова.

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор ЕРШОВ А.И.

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор ДОМАНСКИЙ И.В.,  
кандидат химических наук, старший научный сотрудник  
ХОЛПАНОВ Л.П.

Ведущая организация: Институт тепло- и массообмена  
имени А.В.Лыкова АН БССР.

Защита состоится 3 декабря 1980 г. в 10 час.  
на заседании специализированного совета К-056.01.03 по присуждению ученой степени кандидата наук в Белорусском технологическом институте им.С.М.Кирова по адресу: 220630, г.Минск, ул.Свердлова, 13а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского технологического института им.С.М.Кирова.

Автореферат разослан 31 октября 1980 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

ДЗЮБА В.Д.

Актуальность проблемы. Одним из основных направлений научно-технического прогресса в химической и смежных с ней отраслях промышленности является на современном этапе дальнейшее существенное увеличение единичных мощностей агрегатов и технологических линий, а также разработка прогрессивных способов очистки сточных вод и выбросов в атмосферу. Решение поставленных задач требует создания и всестороннего исследования принципиально новых контактных устройств и аппаратов и их внедрение в производство. Увеличение единичной мощности агрегатов преимущественно должно решаться не за счет увеличения габаритов, а путем интенсификации технологических процессов, т.е. путем более эффективной организации контакта фаз и увеличения пропускной способности аппаратов.

Весьма перспективным направлением признано использование в массообменной и теплообменной аппаратуре закрученных потоков. Такая форма движения, благодаря влиянию центробежных сил, интенсифицирует процессы переноса вещества и тепла при взаимодействии фаз и позволяет существенно повысить скорости потоков в зоне контакта, а также снизить металлоемкость оборудования. Последнее обстоятельство играет особо важную роль при проведении технологических процессов в колоннах высокого давления, где выигрыш от снижения металлоемкости во много раз превышает затраты энергии на формирование закрученного потока.

Для широкого применения скоростных аппаратов с взаимодействием фаз в закрученном потоке необходимы надежные методы их расчета, разработка которых требует проведения дальнейших исследований по гидродинамике потоков, определению поверхности контакта фаз и по эффективности массопередачи.

Все вышеизложенное послужило основанием для выполнения настоящей работы.

Цель работы. Установление с помощью совершенных измерительных датчиков гидродинамических закономерностей одно- и двухфазного закрученного потока, разработка методики расчета гидравлического сопротивления контактных устройств с взаимодействием фаз в закрученном потоке и создание новых высокопроизводительных аппаратов для проведения тепло-массообменных процессов.

15863/5

Объекты исследований. Объектами исследований были опытные установки для изучения структуры одно- и двухфазного закрученного потока в гладких цилиндрических трубах диаметром 32, 70 и 100 мм. На входных участках труб устанавливались статические закручивающие устройства, выполненные в виде лопастного, шнекового и целевого закручивателей с различными геометрическими параметрами. Лабораторные исследования проводились на системе воздух-вода. Полупромышленные испытания выполнены в цехе слабой азотной кислоты Гродненского ПО "Азот" им.С.О.Притыцкого.

Научная новизна. I. Впервые установлены экспериментальные зависимости величины локального трения в одно- и двухфазном закрученном потоке в зависимости от геометрии закручивающих узлов и нагрузок по фазам.

2. Проведено сравнение эффективности закручивателей различных типов по гидродинамическим параметрам создаваемого ими потока.

3. Выполнено измерение характеристик турбулентности однофазного закрученного потока за лопастным закручивателем.

4. Разработана инженерная методика расчета гидравлического сопротивления контактной ступени с соосно расположенными элементами.

5. Предложена на уровне изобретения конструкция нового тепло- и массообменного аппарата, обладающего более высокой эффективностью контакта фаз по сравнению с существующими аналогичными аппаратами при низком гидравлическом сопротивлении.

Практическая ценность. Проведенные исследования позволили спроектировать аппараты для промывки и охлаждения нитрозных газов в цехе слабой азотной кислоты, для непрерывной дистилляции кубовых остатков лактама и для промывки соковых паров на установке предварительной выпарки сульфата аммония. Аппараты внедрены в производство. Экономический эффект от внедрения составил 80 тыс.рублей в год. Разработанные конструкции могут быть рекомендованы для внедрения в ряде других производств.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: УП молодежной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в химическом машиностроении" (г.Харьков, 1976). Всесоюзной конференции "Проблемы

турбулентных потоков жидкости и газа" (г.Донецк, 1977 г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности тепло-массообменных и гидродинамических процессов в текстильной промышленности и производстве химических волокон" (г.Москва, 1976 г.), научно-технических конференциях Белорусского технологического института им.С.М.Кирова (1976-1980 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 научных статей, получено 3 положительных решения на изобретения.

Объем работы. Диссертация изложена на 150 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы (107 наименований) и приложения. Иллюстрационный материал содержит 47 рисунков и 1 таблицу.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Во введении обосновывается актуальность данной работы, формулируются цели и задачи исследования.

#### 2. ГИДРОДИНАМИКА ОДНОФАЗНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА.

Анализ практического использования закрученных потоков в химической технике. Закрученные потоки, используемые в технике, можно условно разделить на несколько групп, которые с начала 60-х годов интенсивно исследуются у нас в стране и за рубежом. В настоящей работе рассматриваются закрученные течения, создаваемые в цилиндрических трубах, где пристенные эффекты оказывают большое влияние на затухание тангенциальной скорости по длине трубы. Наибольшее распространение в разрабатываемой колонной аппаратуре получили контактные устройства с восходящим прямоочным движением фаз в трубчатых элементах, установленных на полотно тарелки с сегментными переливками. Каждый контактный элемент имеет узел формирования закрученного газового потока с устройством подвода жидкой фазы внутрь элемента, участок взаимодействия фаз и сепарационное устройство для отделения прореагировавшей жидкой фазы. Общая длина элемента, исходя из конструктивных соображений и условия обеспечения противоточного движения фаз по колонне в целом, не превышает 3-4 его диаметров. Недостатком отмеченных конструкций является повышенное гидравлическое сопротивление, обусловленное наличием входного и сепарационного узлов, и рециркуляция жидкости на тарелке. При поддер-

жании необходимой кратности циркуляции ( $K \approx 3$ ) существующие сепарационные устройства не обеспечивают хорошего разделения фаз на выходе из контактного элемента. С целью уменьшения гидравлического сопротивления устройства с прямоточно-центробежными элементами предложены конструкции, в которых процесс взаимодействия газа и жидкости осуществляется в длинных контактных трубах. Принцип взаимодействия фаз здесь аналогичен описанному выше - на определенных чередующихся участках труб вводится свежая и отводится прореагировавшая жидкость, но отдельная контактная ступень работает без рециркуляции жидкости. Практическая реализация таких аппаратов потребовала проведения комплексных исследований, результаты которых излагаются ниже.

Экспериментальное исследование структуры ядра однофазного закрученного потока при различных конструкциях завихрителей. Экспериментальное исследование структуры однофазного закрученного потока проводилось зарубежными и советскими учеными. К настоящему времени установлены некоторые его закономерности. Неоднократно делались попытки установления связи между профилями скоростей и геометрией завихрителя, получения универсального профиля тангенциальной скорости и др.

В настоящей работе измерение профилей скорости в закрученном потоке проводилось с помощью методики раздельных замеров пространственного угла направления вектора скорости, полного и статического давлений для шнековых, аксиальных и тангенциальных завихрителей с различными геометрическими параметрами в трубах диаметром 32 и 70 мм. Трубки Пито и двухканальный угломер были изготовлены из медицинских игл диаметром 2 мм.

В качестве критерия закрутки потока использовался параметр, определяемый как отношение углового импульса потока к осевому импульсу, умноженному на радиус трубы.

$$m = \frac{2\pi\rho \int_0^R U_z U_r r^2 dr}{2\pi\rho \int_0^R U_z^2 r dr R}$$

Выполненные нами расчеты оказались аналогичными приведенным литературным данным.

Определение локального трения на стенке трубы. Известно несколько способов определения поверхностного трения, основанных на его непосредственном измерении (плавающий элемент,

измерение крутящего момента), на свойствах пограничного слоя (датчики Стантона и Престона), на применении электрохимического метода и др.

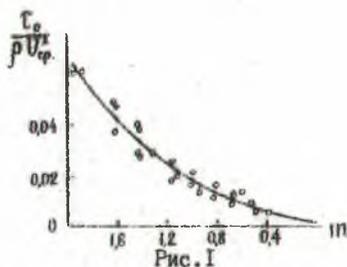
В данной работе значения  $\tau_0$  определялись с помощью датчика Престона, который был изготовлен из медицинской иглы диаметром 0,65 мм и предварительно протарирован в прямоугольном аэродинамическом канале. Угол направления вектора скорости потока вблизи стенки определялся двухканальным датчиком-угломером, величины  $P_n$  и  $P_{ст.}$  считывались с дифманометра с точностью до 0,1 Н/м<sup>2</sup>. Величина  $\tau_0$  рассчитывалась по уравнению:

$$\lg \left( \frac{\tau_0 d^2}{4 \rho V^2} \right) = -1,306 + 0,863 \left[ \frac{(P_n - P_{ст.}) d^2}{4 \rho V^2} \right] \quad (1)$$

Величина среднего значения поверхностного трения определялась также из баланса сил в осевом направлении и баланса моментов, приложенных к контрольному объему между двумя сечениями.

Измеренные и расчетные значения  $\tau_0$  для различных типов закручивателей нанесены на рис. I в зависимости от критерия крутки  $M$ .

Анализ полученных данных показывает, что величина касательных напряжений на стенке трубы в закрученном потоке определяется только величиной закрутки потока и практически не зависит от конструкции завихрителя.



### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ.

Выбор методики и проведение экспериментальных исследований. Знание характеристик турбулентности закрученного потока необходимо для установления его особенностей и отличий от осевых течений, а также для описания закономерностей тепло- и массопереноса в трубах и каналах. В опубликованных работах, посвященных этому вопросу, приводятся экспериментальные результаты по профилям турбулентных пульсаций скорости и их корреляций, однако они носят противоречивый характер.

В настоящей работе представлены результаты измерения турбулентного закрученного потока методом наклонной нити, сущность которого заключается в том, что датчик с наклонной нитью помещается в некоторой точке течения под определенными углами к осям координат. При вращении датчика вокруг оси нить занимает различные положения относительно осредненного вектора скорости, в каждом из которых производятся измерения среднего и пульсационного напряжений, снимаемых с выхода термоанемометра. Используя измеренные значения, можно рассчитать искомые величины трех компонент средней скорости и шести компонент Рейнольдсовых напряжений.

Измерение характеристик турбулентности проводилось в ИТМО АН БССР с помощью комплекса термоанемометрической аппаратуры "DISA 55 D01" на специально изготовленной установке. Экспериментальная установка обеспечивала на срезе сопла прямолинейный профиль скоростей потока, необходимый для получения тарировочных характеристик датчиков термоанемометра. Измерения турбулентных характеристик закрученного потока проводились в цилиндрической трубе диаметром 70 мм на расстоянии 7 диаметров от закручивателя.

Для закрутки потока использовался статический лопастной завихритель с углом наклона лопаток к горизонту  $30^\circ$ . Средне-расходная скорость воздушного потока изменялась в диапазоне  $5 \pm 20$  м/с, значение динамической скорости определялось с помощью датчика Престона.

В качестве чувствительного элемента анемометра использовался однопиточный датчик с наклонной нитью диаметром  $d = 5$  мк. Нить путем электролиза покрывалась медью до  $d = 40$  мк за исключением центрального участка длиной  $l = 1,2$  мм.

Тарировочная характеристика аппроксимировалась законом Кинга:

$$E^2 = E_0^2 + B(d; \beta) U^n, \quad (2)$$

где для показателя  $n$ , согласно литературным данным, принято значение  $n = 0,5$ .

Определение компонент средней скорости и Рейнольдсовых напряжений в закрученном потоке. Для флуктуаций скорости в координатной системе, ориентированной по вектору скорости, можно записать:

$$\frac{2 E' \hat{E}}{B(0; 90) \hat{U}^{2n}} = \hat{a}_i \frac{W}{\hat{U}}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

Строго говоря, линейное соотношение (3) между пульсациями скорости  $W'_i$  и пульсирующей напряженности  $E'$  справедливо только при относительно небольшой интенсивности турбулентности. Чтобы избежать погрешности, вносимой нелинейностью тарировочной кривой при больших турбулентных пульсациях скорости, мы поступили следующим образом. В измерительную схему после анемометра включался линеаризатор 55D10, представляющий собой аналоговую вычислительную машину, который линеаризовал выходной сигнал анемометра согласно функции

$$\hat{E}_L = K (\hat{E}^2 - E_0^2)^2 \quad (4)$$

Из уравнения (3) следует:

$$\hat{E}^2 = E_0^2 + \left( \frac{\hat{E}_L}{K} \right)^{1/2} \quad (5)$$

и для пульсационной составляющей напряженности:

$$\hat{E}'^2 = \frac{[(\hat{E}_L + \sqrt{\hat{E}_L^2})^{1/2} - (E_0)^{1/2}]^2}{4 K \hat{E}^2} \quad (6)$$

При возведении в квадрат уравнения (3) и осреднения по времени получаем следующее выражение:

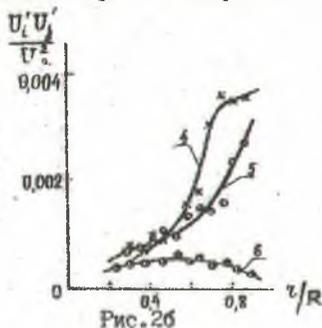
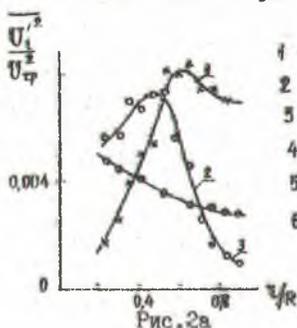
$$\frac{4 \hat{E}'^2 \hat{E}^2}{B^2(0; 90) \hat{U}^{2n}} = a_i a_j \frac{W'_i W'_j}{\hat{U}^2}, \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (7)$$

Подставляя рассчитанные по уравнениям (5) и (6) значения  $\hat{E}^2$  и  $\hat{E}'^2$  в выражение (7), получаем систему алгебраических уравнений шестого порядка. Решая эту систему, определяем искомые корреляции  $W'_i W'_j$ . Получение тарировочных зависимостей, вычисление компонент скорости и тензора напряжений Рейнольдса выполнялось на ЭВМ "Минск-22".

Рассчитанные профили скоростей и измеренные с помощью трубки Пито совпадают за исключением центральной области около оси трубы. Это связано с большим градиентом скорости вблизи оси. Распределение по радиусу значений интенсивности турбулентных пульсаций скорости, определенных в неподвижной системе координат, показано на рис. 2а.

Следует отметить, что при решении системы уравнений (7) для определения неизвестных корреляций  $W'_i W'_j$  возникают значительные трудности, особенно для центральной области трубы. Несмотря на большое число дублей, не удалось исключить разброс точек в этой области. Однако изменение по радиусу ин-

тенсивности турбулентности, направленной по полной скорости, хорошо согласуется с литературными данными. На рис. 26 показано изменение корреляций  $\overline{U_2'U_4'}/U_{\text{cp}}^2$ ,  $\overline{U_2'U_v'}/U_{\text{cp}}^2$  и  $\overline{U_1'U_v'}/U_{\text{cp}}^2$  по сечению трубы. Величина трения на стенке  $\tau_0$ , измеренная датчиком Престона, оказывается на 20% больше величины  $\rho\sqrt{(\overline{U_1'U_2'})^2 + (\overline{U_1'U_v'})^2}$ , определенной вблизи стенки трубы. Это обстоятельство может служить хорошим контролем измерений.



#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГАЗОВОГО ЯДРА ДВУХФАЗНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА.

Измерение профилей давлений и скорости. В двухфазном закрученном потоке, благодаря наличию центробежной силы, почти все газовое ядро за исключением области пограничного слоя и узкой центральной части свободно от наличия крупных капель жидкости. Это позволяло использовать для измерений описанную выше методику разделных замеров углов направления вектора полной скорости и давлений с периодической продувкой датчиков сжатым воздухом. Сильная деформация профиля осевой скорости под действием касательных напряжений на межфазной поверхности позволила рассчитать и радиальную составляющую полной скорости. Максимальные значения ее находятся примерно на половине радиуса трубы и по величине не превышают 3-4% от среднерасходной — даже при больших нагрузках по жидкости.

Касательные напряжения на поверхности раздела фаз. Двухфазные течения подчиняются всем основным законам гидродинамики, однако их уравнения движения оказываются более сложными, чем в случае однофазных течений. По аналогии с однофазным потоком касательные напряжения на поверхности раздела фаз находились из баланса сил и моментов, приложенных к ци-

линдрическому элементу трубы, охваченному межфазной поверхностью раздела. В этом отличие от соответствующих уравнений для однофазного потока, где выделенный элемент ограничен стенкой трубы.

$$2\pi \int_0^{R_i} (\rho U_z^2 + G_L U_L)_I r dr + 2\pi \rho \int_0^{R_i} P_{\sigma_I} r dr = 2\pi \int_0^{R_i} (\rho U_z^2 + G_L U_L)_II r dr + 2\pi \rho \int_0^{R_i} P_{\sigma_{II}} r dr + \tau_{i\pi} 2\pi R_i (L_{II} - L_I) \quad (8)$$

$$2\pi \int_0^{R_i} (\rho U_z U_v + G_L W_L)_I r^2 dr = 2\pi \int_0^{R_i} (\rho U_z U_v + G_L W_L)_II r^2 dr + \tau_{iv} 2\pi R_i^2 (L_{II} - L_I) \quad (9)$$

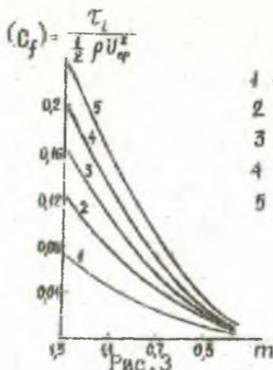
$$\tau_i = \sqrt{\tau_{i\pi}^2 + \tau_{iv}^2} \quad (10)$$

Гравитационный член в уравнении (8) опущен. Поскольку определение скорости капель является сложной задачей, а надежные опытные данные пока отсутствуют, определяемое по (8)+(10)  $\tau_i$  включает в себя и величину потерь энергии на ускорение капель между двумя сечениями. Потери эти, по данным некоторых исследований, не превышают 6+10%, а в некоторых случаях унос капель с поверхности пленки почти отсутствует.

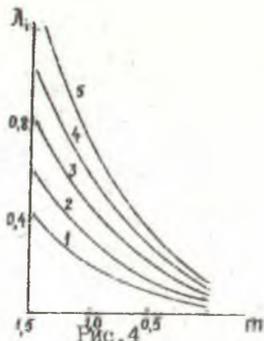
Значения касательных напряжений  $\tau_i$  получены по (8)+(10) для различных конструкций завихрителей. Плотность орошения неменялась в диапазоне 0,3+1,05 м<sup>3</sup>/м.ч, среднерасходная скорость 15-25 м/с. Жидкость подавалась в элемент через кольцевую щель в стенке. Опытные значения  $\tau_i$  были аппроксимированы полиномом для каждого значения  $q$ , и полученные кривые нанесены на рис.3 в зависимости от критерия крутки  $M$ . При  $M \rightarrow 0$  мы практически имеем дело с осевым двухфазным потоком, поэтому полученные значения безразмерного коэффициента трения сравнивались с литературными. При малых значениях  $q$ , эти величины совпадают, с увеличением же плотности орошения разность значений опытных и литературных данных достигает 30%. С учетом изложенного выше такое расхождение результатов можно считать удовлетворительным.

Потери энергии в закрученном потоке определялись по уравнению

$$2\pi \rho \int_0^{R_i} P_{n_I} r dr = 2\pi \rho \int_0^{R_i} P_{n_{II}} r dr + \frac{\lambda_i}{D} \frac{\rho U^2}{2} (L_{II} - L_I) \quad (11)$$



- 1 -  $\varphi = 0$   
 2 -  $\varphi = 0,35$   
 3 -  $\varphi = 0,55$   
 4 -  $\varphi = 0,75$   
 5 -  $\varphi = 1,05$



Полученные экспериментальные значения коэффициента трения  $\lambda_i$ , аппроксимированные полиномами, нанесены на рис. 4 в зависимости от критерия крутки  $m$ . При  $m = 0$  соблюдается строгое равенство:

$$\lambda_i = \frac{8 \tau_c}{\rho U_{cp}}$$

Распределение турбулентных касательных напряжений в двухфазном закрученном потоке. С целью упрощения системы уравнений Навье-Стокса была сделана попытка оценить порядок величин трех компонент средней скорости, давления, шести компонент тензора турбулентных касательных напряжений, их производных по длине и по радиусу трубы в закрученном потоке. Приведя все величины к безразмерному виду, отбросив члены, вклад которых по отношению к остальным не превышал 24%, и проинтегрировав численным методом левые части уравнений, получаем распределение величин  $\tau_{rz}$  и  $\tau_{r\theta}$  по радиусу трубы для разных значений  $\varphi$  (рис. 5). Точность полученных результатов обеспечивалась тщательным многократным проведением измерений и вычислений по стандартным программам с отбраковкой плохо измеренных точек. Если среднеквадратичная ошибка на некоторой стадии превышала 1+2%, то вносились коррективы в программу вычислений. Если она не превышала 10+20%, причем уменьшалась при увеличении закрутки.

Получив распределение величин  $\tau_{rz}$  и  $\tau_{r\theta}$ , рассчитывались соответствующие компоненты эффективной вязкости и величина длины "пути перемешивания" Прандтля в осевом и тангенциальном направлениях. Проведя анализ полученных результатов, можно отметить, что наибольшие значения касательных напряжений

и вихревой вязкости в исследуемых конструкциях контактных устройств наблюдаются около межфазной поверхности раздела. Это способствует интенсификации процессов тепло- и массообмена на границе раздела фаз. В центральной зоне трубы при больших нагрузках по жидкости эти величины значительно меньше, в то время, как значения осевой скорости в этой области потока приближаются к среднерасходной. Это способствует тому, что при малой длине контактной трубы часть газового потока проходит ее, не вступая во взаимодействие с пленкой жидкости. По-видимому, только этим можно объяснить тот факт, что эффективность прямоточно-центробежных контактных устройств не превышает в среднем величины, равной 0,6±0,7.

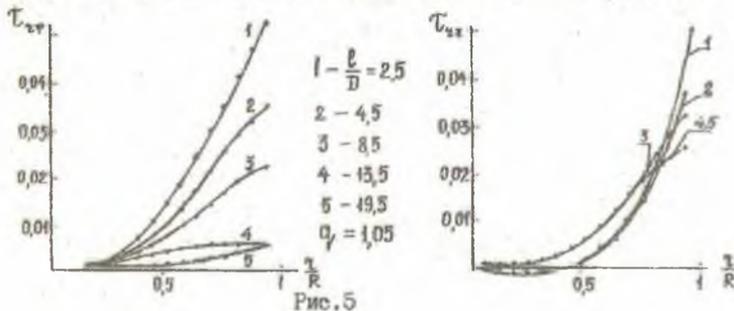


Рис. 5

### 5. РАЗРАБОТКА НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОНТАКТНЫХ СТУПЕНЕЙ.

Как уже отмечалось, ранее разработанные контактные устройства с закруткой газового потока на входном участке обладают повышенным гидравлическим сопротивлением по сравнению с колпачковыми, ситчатыми и др. Условно гидравлическое сопротивление данных контактных устройств можно разделить на сопротивление входа, включающего узел формирования двухфазного потока, сопротивление трения на границе раздела фаз и сопротивление выхода с узлом сепарации. При этом доля потерь энергии на трение, которая определяет количество переданной массы, в коротких контактных элементах не превышает 5±10%, потери на входе составляют около 50% и выходе - 40%. Такое соотношение можно резко изменить, если расположить элементы соосно, непосредственно друг над другом. Тогда потери на трение составят около 60%, входа - 35±40%, сопротивлением выхода можно пренебречь.

Еще одним способом увеличения эффективности контактных

элементов является организация взаимодействия потоков газа и жидкости в центральной части трубы. Такое конструктивное решение удалось осуществить в противоточном пленочном аппарате, разработанном на уровне изобретения с участием автора.

Гидравлическое сопротивление предложенных прямооточных и противоточных контактных устройств, внедренных в ряде производств Гродненского ПО "Азот" им.С.О.Притыцкого, определялось по полученным зависимостям для расчета потерь давления в закручивающих устройствах и на границе раздела фаз.

Экономический эффект от внедрения составляет 80 тыс. рублей.

## В В О Д Ы

1. На основании анализа механизма переноса импульса и вещества предложена методика для сравнения эффективности закрученных потоков, создаваемых завихрителями различного конструктивного исполнения.

2. Установлена возможность применения датчика Престона для измерения локального трения на стенке трубы в закрученном потоке.

3. Предложена методика расчета локальных значений коэффициентов трения в двухфазном закрученном потоке, которые являются функцией только критерия крутки и плотности орошения

4. В результате экспериментального исследования структуры турбулентности установлено, что наибольшие значения касательных напряжений и вихревой вязкости в исследуемых конструкциях наблюдаются у межфазной поверхности, чем обуславливаются высокие значения коэффициентов тепло- и массопередачи в закрученном потоке.

5. На основании анализа структуры турбулентного двухфазного закрученного потока создана новая конструкция противоточного пленочного аппарата, позволяющего организовать взаимодействие фаз во всем объеме контактной трубы (положительные решения по заявкам № 2728634/24-06 от 26.12.79 г. и № 2853931/24-06 от 27.08.80 г.

6. В результате обобщения совокупности теоретических и экспериментально полученных зависимостей предложена методика расчета основных геометрических размеров и режимных параметров прямооточных и противоточных контактных аппаратов с низ-

ким гидравлическим сопротивлением.

7. Проведенные исследования гидродинамики одно- и двухфазного закрученного потока позволили разработать новые технические решения по оформлению процесса охлаждения и промывки нитрозных газов в производстве слабой азотной кислоты, непрерывному выводу и дистилляции кубовых остатков лактама и промывки соковых паров установки предварительной выпарки сульфата аммония на Гродненском ПО "Азот" им. С.О. Притыцкого. Промышленное внедрение новых конструкций аппаратов привело к стабильной работе оборудования и увеличению производительности аппаратов.

Годовой экономический эффект от внедрения составляет 80 тыс. рублей.

#### Основные обозначения

$U$  - полная скорость потока в данной точке, м/с;  $U_{cp}$  - среднерасходная скорость, м/с;  $U_z, w_z$  - осевая и тангенциальная составляющие полной скорости капле жидкости, м/с;  $G_L$  - местная массовая скорость капле жидкости, кг/м<sup>2</sup>с;  $E, E_1, \sqrt{E^2}$  - напряжение, снимаемое с выхода анемометра, линеаризатора и среднеквадратичного вольтметра, В;  $\overline{U_i U_j}, \overline{w_i w_j}$  - компоненты тензора напряжений Рейнольдса, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $\alpha_i$  - коэффициенты чувствительности;  $B(\alpha, \beta)$  - функция, характеризующая наклоны тарировочных прямых Кинга;  $\alpha, \beta$  - углы, характеризующие положение вектора скорости в сферической системе координат, рад.;  $P_n, P_{ст}$  - полное и статическое давление в данной точке, Н/м<sup>2</sup>;  $\tau_o, \tau_i$  - касательные напряжения на стенке трубы и на межфазной поверхности раздела, Н/м<sup>2</sup>;  $\Pi$  - критерий крутиги потока;  $D, R, r$  - внутренний диаметр и радиус трубы, текущий радиус, м;  $R_L$  - средний радиус межфазной поверхности раздела, м;  $d$  - диаметр трубки Пито, м;  $L$  - длина контактной трубы, м;  $\rho$  - плотность орошения, м<sup>3</sup>/м.ч;  $\nu, \rho$  - вязкость и плотность среды, м<sup>2</sup>/с, кг/м<sup>3</sup>;  $K, E_o, \mu$  - константы.

#### Верхние индексы

- - величины, средненные по времени;
- $\Lambda$  - величины, функционально зависящие от средней скорости;
- / - пульсационные величины.

Индексы нижние

X, Y, Z - величины, спроектированные на оси цилиндрической системы координат.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Лажковский В.И., Хотин Л.М., Ершов А.И. Разработка и исследование скоростной контактной ступени элементного типа. Экспресс информация / ЦИНТИ химнефтемаш, 1977, № 2, ХМ-1, с.3-4.

2. Хотин Л.М., Ершов А.И., Плехов И.М. Экспериментальное исследование поверхностного трения в закрученном потоке. - Химия и хим.технология. - Мн.: Высшей.школа, 1977, вып.13, с.140-144.

3. Хотин Л.М., Ершов А.И., Плехов И.М. Исследование трения в одно- и двухфазном закрученном потоке. - Известия АН БССР, сер.физ.-энерг.наук, 1978, № 1, с.84-88.

4. Хотин Л.М., Ершов А.И. Исследование характеристик турбулентности в закрученном потоке. - Известия АН БССР, сер. физ.-энерг.наук, 1979, № 1, с.65-69.

5. Ермакович Н.П., Хотин Л.М., Ершов А.И. Исследование гидродинамики в противоточном пленочном аппарате с вращающимися потоками жидкости и газа. Деп. в "Известиях вузов СССР" - Энергетика", г.Минск, № 223/78 деп.

Леонид Михайлович Хотин

Исследование гидродинамики одно- и двухфазного закрученного потока в трубах и контактных устройствах.

Подписано в печать 29.10.80. АТ № 07576. Формат 60x84 1/16.

Печать офсетная. Усл.печ.л. 0,8. Уч.-изд.л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ 786 Бесплатно.

Отпечатано на роталпринте БТИ им.С.М.Кирова.

220630. Минск, Свердлова, 13.