

А.И. Карпович, И.М. Плехов, А.И. Ершов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ БАРБОТАЖНО-ПРЯМОТОЧНОГО КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА ЭЛЕМЕНТНОГО ТИПА

В процессах теплообмена при непосредственном соприкосновении теплоносителей наряду с теплообменом осуществляется и массообмен, т.е. происходит испарение жидкости и конденсация содержащихся в газе паров, что приводит к значительному изменению весового соотношения потоков  $\frac{L}{G}$  по высоте аппарата. Так, например, при охлаждении конверсионного газа конденсатом в производстве синтетического аммиака соотношение потоков изменяется в пределах  $\frac{L}{G} = 5 \div 25$ .

В настоящее время эти процессы осуществляются преимущественно в насадочных колоннах. Насадочные колонны, относящиеся к категории аппаратов с противотоком фаз в зоне контакта, обеспечивают значительную поверхность соприкосновения фаз и стабильно работают в широком диапазоне изменения соотношения потоков, но являются малопродуктивными вследствие низких допустимых скоростей газовой фазы в свободном сечении (0,3–0,5 м/сек), что требует в условиях многотоннажного производства создания аппаратов очень больших размеров.

Осуществление прямоточного взаимодействия фаз в зоне контакта при обеспечении противотока от ступени к ступени позволяет резко увеличить скорость газового или парового потока. Коэффициент тепло-массопередачи возрастает при этом в несколько раз.

Известны конструкции аппаратов для прямоточного взаимодействия газа с жидкостью (1—2), работающие устойчиво только при определенном соотношении потоков с ограниченным временем межфазного контакта.

Авторами создано барботажно-прямоточное контактное устройство (рис. 1), обеспечивающее устойчивую работоспособность в широком диапазоне изменения соотношения фаз  $\frac{L}{G}$  и продолжительное время контакта. Оно состоит из барботажной тарелки 1, смонтированной в аппарате 2, на которой закреплены сужающиеся кверху и изогнутые контактные элементы 3 с тангенциально направленным к стенке аппарата выходом, а также индивидуальные переливные трубы 4 на каждый элемент.

Контактное устройство работает следующим образом.

Газовый поток, проходя через барботажную тарелку, взаимодействует с жидкостью и увлекает ее за собой. Сужающие элементы обеспечивают интенсивное взаимодействие фаз на ступени при их непрерывно-ускоряющемся движении в зоне контакта. При выходе из контактного элемента двухфазный газо-жидкостный поток тангенциально направляется к стенке аппарата, в результате чего под действием

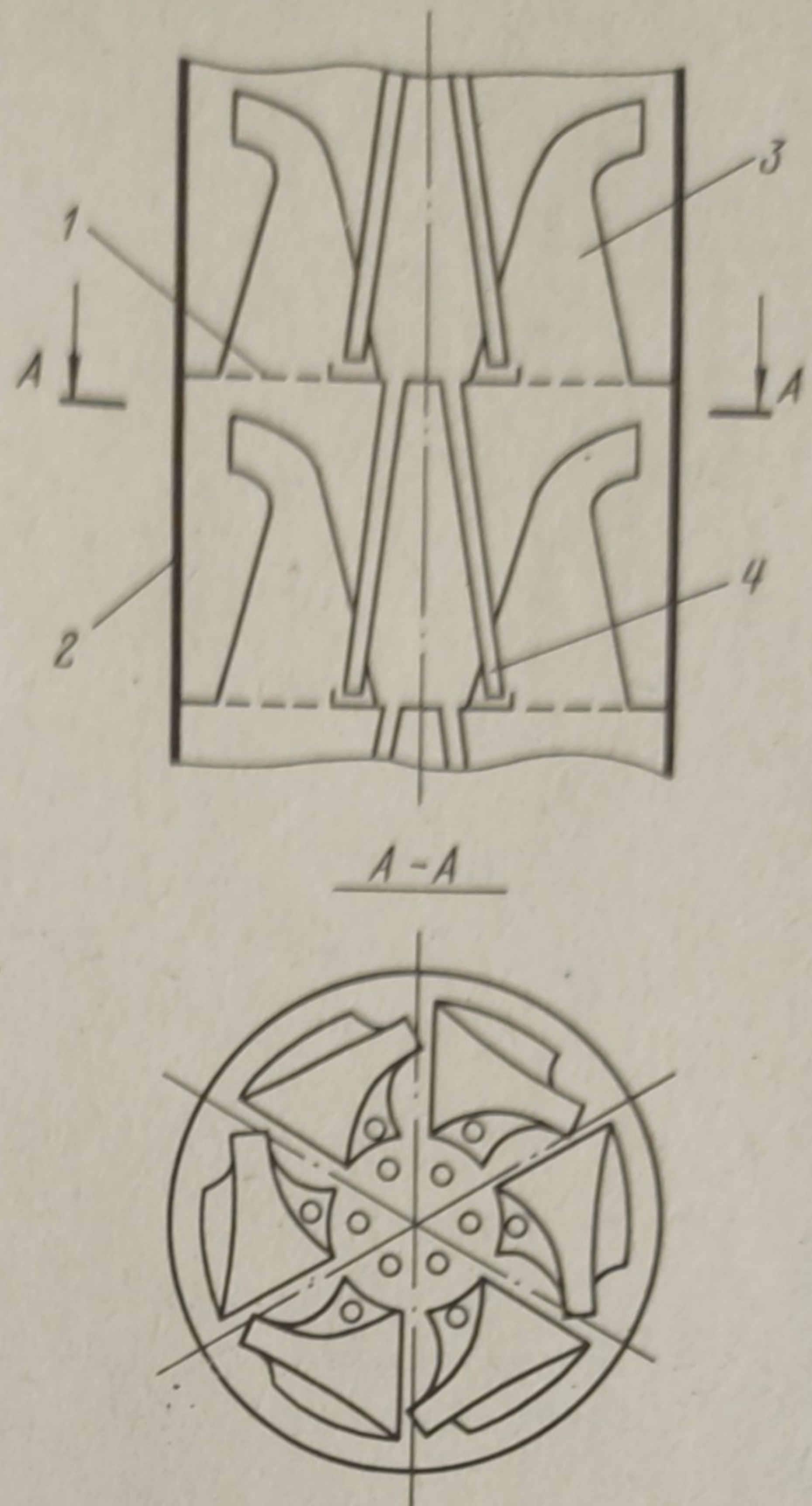


Рис. 1. Схема аппарата с барботажно-прямоточными устройствами элементного типа

центробежных и гравитационных сил происходит сепарация фаз. Переток жидкости с тарелки на тарелку осуществляется по индивидуальным переливным трубам непосредственно в каждый контактный элемент.

В настоящей работе изучалось влияние жидкостных и газовых нагрузок, изменения геометрических параметров (отношения площади отверстий ситчатой тарелки к площади выходного отверстия контактного элемента  $\frac{F_{отв}}{F_{вых}}$ ) контактного элемента на гидродинамические

режимы взаимодействия фаз.

Схема экспериментальной установки для исследования гидродинамики барботажно-прямоточного контактного устройства представлена на рис. 2.

В аппарат 1 диаметром 200 мм с высотой царг 360 мм в межфланцевое соединение вмонтированы ситчатые тарелки 2 с одним контактным элементом 3 на каждой, а также сепарационная тарелка 4. Для возможности визуального наблюдения царги аппарата и контактные элементы были выполнены из органического стекла.

Воздух в аппарат подавался из заводской технологической линии. Расход воздуха регулировался вентилем 5 и замерялся по перепаду давления на камерной диафрагме 6, рассчитанной и установленной на трубопроводе в соответствии с нормами [3], U-образным манометром 7.

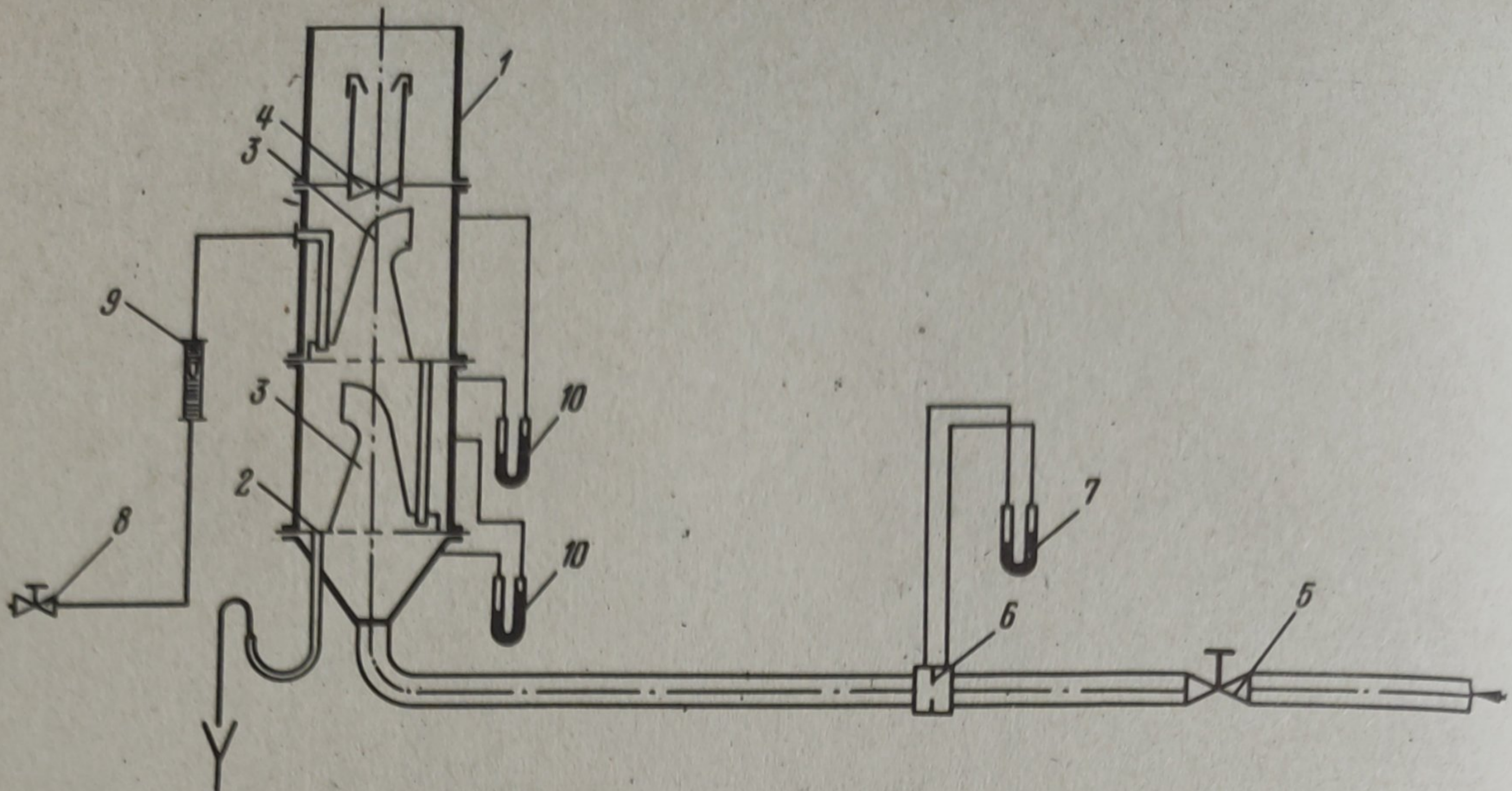


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Вода из водопроводной сети, проходя через вентиль 8 и ротаметр 9 марки РС-7, отградуированный по воде, попадала в контактный элемент. Отработанная вода через гидрозатвор сбрасывалась в канализацию.

Гидравлическое сопротивление каждой барботажно-прямоточной тарелки заменялось U-образными манометрами 10.

При проведении исследований скорость воздуха на выходе из контактного элемента менялась от 5 до 40 м/сек, весовое соотношение потоков  $\frac{L}{G}$  от 5 до 25, отношение площади отверстий ситчатой

тарелки к площади выхода из контактного элемента  $\frac{F_{отв}}{F_{вых}}$  от 0,25 до 1,5.

Результаты испытаний показали, что сопротивление сухой тарелки во всем диапазоне скоростей газа изменяется по квадратичному закону, т.е. критерий  $Eu_2$  не зависит от числа  $Re_2$  и описывается одним уравнением. Наблюдается режим развитой турбулентности (автомобильный режим), при котором молекулярная вязкость не оказывает влияния на гидравлическое сопротивление.

Изменение отношения площади отверстий к площади выхода контактного элемента  $\frac{F_{отв}}{F_{вых}}$  меняет условия прохождения газового

потока и значительно влияет на величину сопротивления (рис. 3).

Обработка экспериментальных данных позволила получить частную зависимость критерия  $Eu_2$  от геометрического параметра  $\frac{F_{отв}}{F_{вых}}$

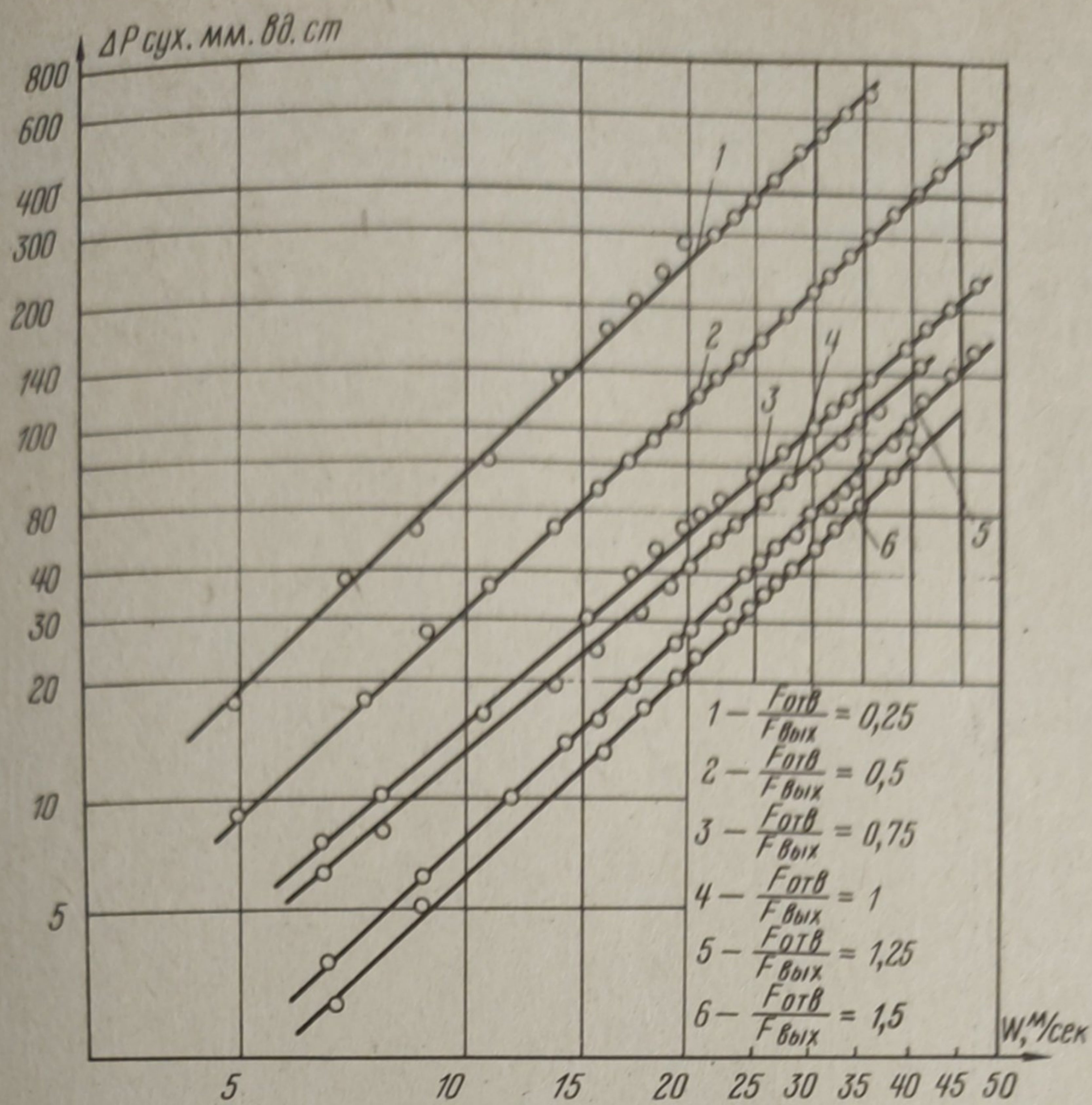


Рис. 3. Зависимость сопротивления контактного устройства от скорости газа на выходе из контактного элемента:

$$1 - \frac{F_{\text{отв}}}{F_{\text{вых}}} = 0,25; \quad 2 - \frac{F_{\text{отв}}}{F_{\text{вых}}} = 0,5; \quad 3 - \frac{F_{\text{отв}}}{F_{\text{вых}}} = 0,75; \quad 4 - \frac{F_{\text{отв}}}{F_{\text{вых}}} = 1; \quad 5 - \frac{F_{\text{отв}}}{F_{\text{вых}}} = 1,25; \quad 6 - \frac{F_{\text{отв}}}{F_{\text{вых}}} = 1,5$$

для сухой тарелки, которая имеет вид:

$$Eu_2 = 0,755 \left( \frac{F_{\text{отв}}}{F_{\text{вых}}} \right)^{-1,33} \quad (1)$$

или

$$\Delta P_{\text{сух}} = 0,755 \left( \frac{F_{\text{отв}}}{F_{\text{вых}}} \right)^{-1,33} w_2^2 \rho_2, \quad (2)$$

где  $Eu_2 = \frac{\Delta P_{\text{сух}}}{\rho_2 w_2^2}$  — критерий Эйлера;  $\Delta P_{\text{сух}}$  — потеря напора на тарелке, кгс/м<sup>2</sup>;  $w_2$  — скорость газа на выходе из контактного элемента, м/сек;  $\rho_2$  — плотность газа, кгс сек/м<sup>4</sup>;  $F_{\text{отв}}$  — соответственно площадь отверстий и выхода контактного элемента, м<sup>2</sup>.

Сравнение расчетных данных, определенных по уравнению (2), с экспериментальными показало достаточно хорошее совпадение результатов. Основная часть отклонений расчетных и опытных данных лежит в пределах  $\pm 5\%$ .

В процессе исследования орошаемой тарелки было установлено четыре гидродинамических режима.

Эти режимы наблюдались визуально и достаточно четко различимы на графике зависимости гидравлического сопротивления орошаемого контактного устройства  $\Delta P_{2-ж}$  от скорости  $w_2$  (рис. 4).

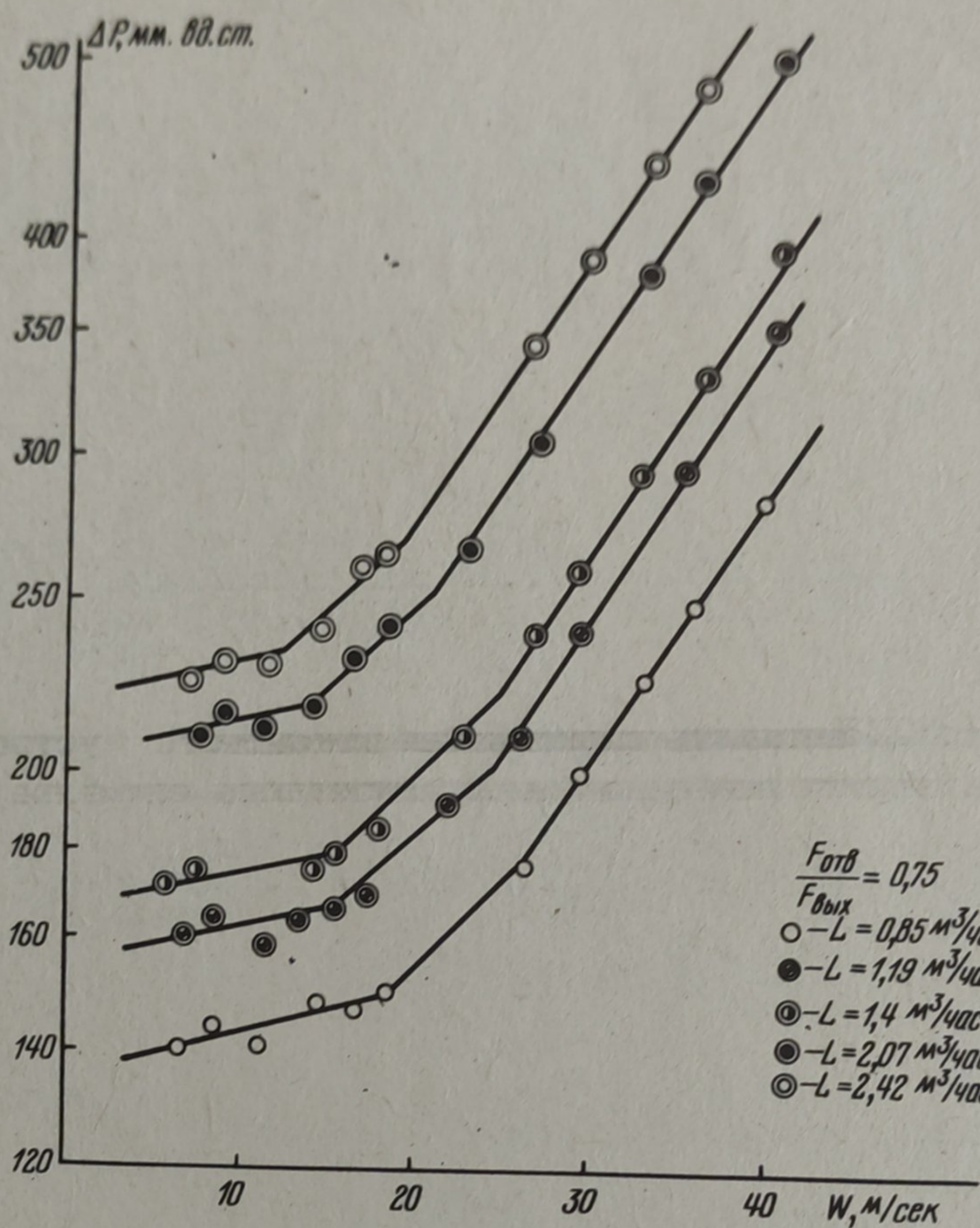


Рис. 4. Зависимость сопротивления орошаемого контактного устройства от скорости газа на выходе из контактного элемента:

$$\frac{F_{отв}}{F_{вых}} = 0,75; \quad 1 - L = 0,85 \text{ м}^3/\text{час}; \quad 2 - L = 1,19 \text{ м}^3/\text{час}; \quad 3 - L = 1,4 \text{ м}^3/\text{час}; \quad 4 - L = 2,07 \text{ м}^3/\text{час}; \quad 5 - L = 2,42 \text{ м}^3/\text{час}$$

1. Режим полного провала жидкости (на графике не показан), когда жидкость неравномерно стекает через отверстия барботажной тарелки, а газ в виде отдельных пузырей барботирует через жидкость.

Гидравлическое сопротивление мало и почти не растет при увеличении скорости газа.

2. Пульсирующий режим наступает при дальнейшем увеличении скорости газа, когда провал жидкости прекращается. Жидкость совершает в контактной трубке возвратно-поступательное движение, часть ее периодически выбрасывается на тарелку, а газ проходит через жидкость крупными пузырями. Сопротивление носит также резко выраженный пульсирующий характер, и здесь можно говорить лишь о его среднем значении.

3. Переходный режим. С увеличением скорости газа амплитуда пульсирующего гидравлического сопротивления быстро затухает, а частота их растет. Газо-жидкостный поток в контактной трубке движется в виде почти однородной диспергированной массы газа и жидкости. Сопротивление тарелки растет по закону, несколько меньше квадратичного.

4. Прямоточный режим. Газо-жидкостная система движется в виде однородной диспергированной массы газа и жидкости, представляя газо-жидкостную эмульсию. Рост сопротивления происходит по квадратичной зависимости от скорости газа. Наступает автомодельный режим.

Обработка экспериментальных данных позволила получить расчетные уравнения для трех последних режимов тарелки.

Пульсирующий режим

$$\xi = 267 \left( \frac{L}{G} \right)^{0,42} \cdot w_2^{-1,53} \quad (3)$$

Скорость перехода пульсирующего режима в переходный определяется по уравнению

$$w_{кр I} = 47,9 \left( \frac{L}{G} \right)^{0,34} \left( \frac{F_{отв}}{F_{вых}} \right)^{0,74} \quad (4)$$

Переходный режим

$$\xi = 5,58 \left( \frac{L}{G} \right)^{0,57} \left( \frac{F_{отв}}{F_{вых}} \right)^{0,26} w_2^{-0,36} \quad (5)$$

Скорость перехода переходного режима в равномерный

$$w_{кр II} = 95 \left( \frac{L}{G} \right)^{0,34} \left( \frac{F_{отв}}{F_{вых}} \right)^{1,25} \quad (6)$$

Прямоточный режим

$$\xi = 0,878 \left( \frac{L}{G} \right)^{0,7} \left( \frac{F_{отв}}{F_{вых}} \right)^{-1} \quad (7)$$

где  $\frac{L}{G}$  — весовое соотношение потоков,  $\frac{\text{кг жидкости}}{\text{кг газа}}$ ;  $\xi$  —

коэффициент гидравлического сопротивления.

Сравнение расчетных данных, полученных по уравнениям (3—7), показало хорошее совпадение с опытными результатами. Процент ошибки не превышает  $\pm 10\%$ .

### Выводы

1. Разработана конструкция барботажно-прямоточного устройства элементного типа, обеспечивающая устойчивую работу аппарата при изменении соотношения потоков  $\frac{L}{G}$  по высоте аппарата, продолжительное время межфазового контакта и высокую степень турбулизации жидкой фазы.

2. Сопротивление сухой тарелки незначительно и во всем диапазоне скоростей газа изменяется по квадратичному закону.

3. Получены критериальные уравнения, позволяющие вести расчет и проектирование барботажно-прямоточных тарелок с минимальными гидравлическими сопротивлениями.

### Литература

1. В.И. Матрозов, П.А. Семенов, Ю.В. Туманов. Хим. пром-ость, №3 (1960)
2. В.А. Булкин, Н.А. Николаев, А.М. Николаев. Химическое и нефтяное машиностроение, №12 (1970).
3. Правила № 27—54 по изменению и проверке расходомеров с нормальными диафрагмами, соплами, трубами Вентури. М., 1960.