

Л.М.Гухман, А.И.Ершов,И.П.Плехов

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССООБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ФАЗ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Согласно современным взглядам на процесс тепло-массо-передачи [1,2], в турбулентном двухфазном потоке можно рассматривать две диффузионные области: собственно турбулентный поток и пограничный слой.

Связь между коэффициентом массоотдачи β и касательным напряжением на границе раздела фаз с учетом пограничного слоя выражается уравнением, получаемым совместным решением уравнений переноса массы и энергии в турбулентном потоке

$$St = \frac{\tau_0}{\rho U^2 \left[1 + \frac{U'}{U} (Pr - 1) \right]} \quad (1)$$

При выводе уравнения (1) принято, что отношение коэффициентов турбулентной диффузии и турбулентной вязкости равно единице. Экспериментальная проверка [3] показала, что в действительности это отношение несколько отличается от единицы и может изменяться от 1 до 2.

Уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$\beta = \frac{\tau_0}{\rho U \left[1 + \frac{U'}{U} (Pr - 1) \right]} \quad (2)$$

Таким образом, с точки зрения гидродинамического взаимодействия фаз, коэффициент массоотдачи при данной средней скорости движения зависит от величины касательного напряжения и соотношения скоростей в пограничном слое и в ядре потока.

Касательное напряжение определяется по теоретическому уравнению, полученному Семеновым / 4 /, которое при прямом движении фаз можно представить в виде

$$\tau_0 = \frac{(\pm g \rho s^2 - \frac{\Delta P}{l} s^2 - 2 \mu_{ж} U')}{2 S} \quad (3)$$

Знак минус соответствует восходящему потоку, знак плюс - нисходящему.

С целью интенсификации процессов тепло- и массопереноса в настоящее время разрабатываются и исследуются конструкции скоростных контактных устройств с прямоточным взаимодействием фаз в восходящем и нисходящем потоках [5,6,7].

Еще более целесообразным по данным ряда работ [8,9,10] является создание в зоне контакта двухфазного закрученного потока, обеспечивающего высокую эффективность процесса и достаточно полное разделение фаз в поле центробежных сил при высоких скоростях газа.

В данном сообщении на основании анализа гидродинамической картины взаимодействий фаз сделана попытка выяснить характер изменения основных параметров в двухфазном кольцевом потоке и их влияние на коэффициент массоотдачи для прямоточного движения с закруткой и без нее.

Будем рассматривать орошаемую цилиндрическую трубу радиуса R при условии равенства расходов газовой и жидкой фаз для закрученного и незакрученного потоков.

Анализ уравнения (3) показывает, что при восходящем прямотоке касательное напряжение на границе раздела фаз по величине должно быть выше, чем при нисходящем за счет величины $g \rho s^2$, при условии идентичного профиля скоростей. Причем эта разница, ведущая к увеличению коэффициента массоотдачи, должна выразиться в различной зависимости β от количества орошающей жидкости или режима ее движения. Опыты, проведенные при прямоточном движении незакрученного потока [6], показали, что для восходящего потока $\beta \sim Re_{ж}^{0,7}$, а для нисходящего $\beta \sim Re_{ж}^{1/3}$.

В действительности распределение скорости в слое жидкости не идентичное [II] и при определенных режимах, когда соотношение скоростей в ядре потока и на границе раздела фаз имеет решающее значение, величина β при одинаковых сред-

них осевых скоростях в случае нисходящего потока получается несколько выше, чем при восходящем.

Уравнение (3) получено для установившегося течения и не учитывает затрат энергии на формирование профиля скоростей в пленке жидкости и на сообщение жидкости соответствующей кинетической энергии.

При строго ламинарном течении пленки жидкости без закрутки, для которого выведено уравнение, эти дополнения невелики и могут не учитываться. В случае же двухфазного закрученного потока дополнительные потери давления становятся существенными и определяются следующими условиями. Во-первых, значительные потери напора обуславливаются сообщением кинетической энергии вращения газожидкостному потоку, которая может быть выражена уравнением

$$E_{кин} = \frac{J_r \omega_r^2}{2} + \frac{J_{mc} \omega_{mc}^2}{2}. \quad (4)$$

Так как в рассматриваемом случае угловые скорости вращения являются функциями радиуса трубы, то выражение (4) можно представить в общем виде:

$$E_{кин} = \pi l \rho_r \int_0^{R-S} r_i^3 \omega_r^2(z) dz + 2\pi l \rho_{mc} \int_{R-S}^R r_i^3 \omega_{mc}^2(z) dz \quad (5)$$

При одинаковой длине контактной трубы потери на трение в закрученном потоке возрастают, так как фактический путь движения фаз значительно больше, чем для прямого потока без закрутки, и в зависимости от угла подъема винтовой линии движение определяется следующим соотношением

$$l' = \frac{\pi d}{\cos \alpha} \cdot \frac{l}{t}$$

$$t \operatorname{tg} \alpha = \frac{t}{\pi d} \quad \text{или} \quad t = \pi d t \operatorname{tg} \alpha.$$

Откуда

$$l' = \frac{l}{\sin \alpha} \quad (6)$$

Наконец, при вращении жидкой пленки за счет центробежной силы возрастает сила трения жидкости о стенку трубы, направленная противоположно движению потока

$$F_{\text{тр}} = 2\pi l \rho_{\text{ж}} \int_{R-S}^R \tau_i \omega_{\text{ж}}^2(z) dz \quad (7)$$

С учетом этих дополнительных положений величина касательного напряжения в случае закрученного потока значительно увеличивается, что должно привести к росту значения коэффициента массоотдачи β по сравнению с незакрученным потоком.

При этом, в восходящем закрученном потоке величина τ_0 будет больше на величину $2g\rho S^2$, так как действие силы тяжести направлено противоположно направлению движения потока, и коэффициент массоотдачи будет выше, чем при нисходящем закрученном потоке. При постоянной скорости газа эта разница будет зависеть от расхода жидкой фазы.

Весьма важным является выяснение характера влияния скорости движения фаз на величину β в закрученном потоке. Действительная скорость фаз будет зависеть от угла подъема винтовой линии движения. Эта зависимость приближенно, без учета радиальных скоростей, может быть представлена уравнением

$$U_i = \frac{U_{0i}}{\sin \alpha_i} \quad (8)$$

Следовательно, при малых углах винтовой линии закручивателя α полная скорость движения значительно превосходит осевую.

Увеличение скорости движения в закрученном потоке вызывает интенсивный вихревой перенос массы, так как поверх-

ность раздела фаз есть пересечение изобарно-изостерических поверхностей, являющееся необходимым условием образования вихревого движения [12]. Вихревые потоки в тонком слое жидкости приводят к усиленной турбулизации всего потока и выравниванию поля скорости по сечению пленки.

Следовательно, для закрученного потока отношение $\frac{U}{U_0}$ в уравнении (2) будет уменьшаться, что приведет к увеличению β , причем чем меньше угол подъема винтовой линии закручивателя, тем сильнее интенсификация процесса.

Здесь необходимо остановиться на принципиальном различии двух видов формирования закрученного двухфазного потока с закручивателем на всей длине и на начальном участке. В случае установки закручивателя по всей длине трубки создается закрученный двухфазный поток с постоянным по длине шагом винтовой линии движения, т.е. с постоянной круткой потока.

Направление движения потока - нисходящий, либо восходящий - в этом случае будет сказываться лишь в изменении величины T за счет выражения gR^2 . Очевидно, что это влияние должно возрастать при данной скорости газа с увеличением орошения.

При весьма малых углах подъема винтовой линии закручивателя, когда решающим фактором становится перераспределение скоростей в слое жидкости, разница в эффективности между восходящим и нисходящим закрученными потоками должна быть незначительной.

При установке закручивателя только на начальном участке крутка потока является величиной переменной по длине трубы, так как угол α , входящий в зависимость (8), является функцией не только радиуса, но и длины трубки.

Очевидно, что в случае нисходящего потока собственный вес жидкости будет способствовать спрямлению крутки, т.е. увеличению угла α и уменьшению полной скорости фаз на границе раздела при прежней осевой скорости. Такое спрямление крутки будет наиболее существенным при малых скоростях газа и значительном орошении.

В восходящем потоке вес жидкости, наоборот, способствует сохранению крутки потока, однако затраты энергии на подъем жидкости, особенно при высоком орошении и скоростях газа, приводят к некоторому повышению гидравлического сопротивления.

Таким образом, в восходящем закрученном потоке II -го вида более высокая эффективность массообмена должна достигаться не только за счет увеличения ζ_0 , но и благодаря более полному сохранению угла подъема потока по длине трубки. Экспериментальная проверка эффективности восходящего и нисходящего потоков I и II-го видов проводилась в процессе абсорбции CO_2 водой на контактных элементах, конструкция которых представлена на рис.1.

Опыты велись на трубках диаметром 20, 25, 29 мм и длиной 170 мм при скорости газа 7,5-32 м/сек, режимах движения жидкости от $Re_{жк} = 300$ до $Re_{жк} = 2000$ при установке двухзаходных закручивателей с геометрической характеристикой $\Gamma = 1,1$.

Исследование влияния угла подъема винтовой линии закручивателя проводилось на трубке с $D = 25$ мм при установке закручивателей с $\Gamma = \frac{t}{d} = 0,8; 1,12; 1,8; 2,6$. Закрученный поток II-го вида изучался на трубке с $D = 25$ мм при установке в ней короткого статического закручивателя.

Учитывая, что в системе CO_2 - вода при нормальном давлении основное сопротивление диффузии сосредоточено в жидкой фазе, рассчитывался не коэффициент массоотдачи, а объемный коэффициент массопередачи $K_{V_{жк}}$ по формуле

$$K_{V_{жк}} = \frac{G(x_2 - x_1)}{V \Delta X_{ср}} \quad (9)$$

где $\Delta X_{ср}$ - среднелогарифмическая движущая сила.

Результаты опытов во всех режимах и при всех геометрических характеристиках (рис.2 и 3) подтвердили более высокую эффективность восходящего закрученного потока по сравнению с нисходящим.

При обработке экспериментальных данных для закрученного потока I-го вида (рис.2) установлены зависимости для восходящего потока

$$K_{V_{\text{ж}}} \sim U_0 Re_{\text{ж}}^{0,6} \Gamma_1^{-0,23}, \quad (10)$$

для нисходящего

$$K_{V_{\text{ж}}} \sim U_0 Re_{\text{ж}}^{0,45} \Gamma_1^{-0,65} \quad (11)$$

Эти зависимости качественно хорошо согласуются с приведенными выше положениями о влиянии режима движения жидкости и угла подъема винтовой линии закручивателя на эффективность процесса массообмена для закрученного потока I-го вида.

На рис.3 приведены результаты исследования эффективности массопереноса для закрученного потока II-го вида, обработка которых позволила получить следующие соотношения: для восходящего потока

$$K_{V_{\text{ж}}} \sim U_0 Re_{\text{ж}}^{0,49} \Gamma_2^{-0,8}, \quad (12)$$

для нисходящего потока

$$K_{V_{\text{ж}}} \sim U_0 Re_{\text{ж}}^{0,37} \Gamma_2^{-0,4} \quad (13)$$

Эти соотношения также находятся в соответствии с теоретическими предпосылками, однако разница в показателях степени при Γ_2 требует некоторого пояснения.

Как следует из уравнений (12), (13) и рис.3, разница в эффективности восходящего и нисходящего потоков уменьшается с увеличением длины трубы. Это вызывается тем, что в восходящем закрученном потоке ввиду высокой интенсивности процесса концентрация в жидкой фазе очень быстро приближается к равновесной, движущая сила процесса уменьшается, и увеличение длины трубки приводит к более резкому, чем в нисходящем потоке, снижению коэффициента массопередачи.

Учитывая полученные результаты, нами разработана [13] и исследована конструкция скоростного колонного аппарата с взаимодействием фаз в восходящем закрученном потоке (рис.4).

Особенности гидродинамики и массопередачи изучались на модели аппарата при различных режимах движения фаз и различных геометрических параметрах [14].

В зависимости от величины критерия Re для газовой и жидкой фаз на контактной тарелке имеют место четыре гидродинамических режима, для каждого из которых гидравлическое сопротивление может быть рассчитано по уравнению вида

$$Eu = A Re_r^m Re_{mc}^n \Gamma_1^e, \quad (14)$$

где величина показателей степени определяется характеристической режимом [14]. Опыты показали, что границей автономной области, в которой Eu не зависит от Re_r , является $Re_r \geq 14000$.

Кинетика массопередачи исследовалась в процессе абсорбции CO_2 водой на одной контактной тарелке во избежание влияния уноса жидкости на эффективность ступени. В результате обработки опытных данных получено уравнение для расчета коэффициента массопередачи, отнесенного к площади поперечного сечения колонны, приходящейся на один контактный патрубок.

$$K_{S_{mc}} = 4,9 \cdot 10^{-3} U_0 Re_{mc}^{0,9} \Gamma_1^{-0,3} \Gamma_2^{0,4}. \quad (15)$$

Для сравнения исследованного аппарата с известными конструкциями были рассчитаны коэффициенты массопередачи, отнесенные к полному объему ступени $K_{V_{mc}}$. В скоростном колонном аппарате величина $K_{V_{mc}}$ менялась от 60 до 350 (л/час) и в среднем составляла около 200 (л/час), что более чем в 10 раз превосходит эту величину для насадочных колонн [15] и превышает значения, полученные в контактных элементах с взаимодействием фаз в нисходящем закрученном потоке [16].

С целью более полного представления о кинетике массопередачи изучалось влияние расхода фаз и геометрических параметров на степень приближения к равновесию. Было найдено, что для исследованной конструкции $\eta = 0,6 \pm 0,08$, причем степень приближения к равновесию возрастает с увеличением скорости газа, длины контактных патрубков и с уменьшением орошения, угла подъема винтовой линии статических закручивателей.

В ы в о д ы

1. Исходя из анализа гидродинамической картины движения фаз, обоснована высокая эффективность двухфазного закрученного потока. Показано, что восходящий закрученный поток эффективнее нисходящего.

2. Результаты исследования эффективности массообмена при закрученном двухфазном потоке в отдельных контактных элементах подтвердили теоретические положения.

3. Разработана конструкция скоростного колонного аппарата с взаимодействием фаз в восходящем закрученном потоке.

4. Исследованы особенности гидродинамики и массопередачи в разработанной конструкции и предложены основы методики ее расчета.

О б о з н а ч е н и я

α - угол подъема винтовой линии закрученного потока;
 ρ - плотность фазы; S - толщина слоя жидкости; μ_m - динамическая вязкость жидкости; f - коэффициент трения жидкости о стенку; G - расход воды на орошение; V - объем контактной трубки; l - длина трубки; t - шаг винтовой линии; R и d - радиус и диаметр трубки; U - средняя скорость потока; U' - скорость на границе ядра потока и пограничного слоя; τ_0 - касательное напряжение на границе раздела ядра; ω - угловая скорость вращения потока; ΔP - гидравлическое сопротивление орошаемой трубки; β - коэффициент массоотдачи; $K_{s,м}$ - коэффициент массопередачи, отнесенный к площади поперечного сечения колонны, приходящейся на

один контактный патрубок; $K_{v,ж}$ - объемный коэффициент массопередачи, рассчитанный по жидкой фазе; X_2 и X_1 - конечная и начальная концентрация CO_2 в воде; η - степень приближения к равновесию; Re - критерий Рейнольдса; Pr - диффузионный критерий Прандтля; St - критерий Стантона; Eu - критерий Эйлера.

Л и т е р а т у р а

1. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика, Физматгиз, 1952.
2. Розен А.М., Крылов В.С. О роли гидродинамики в теории массопередачи. В сб. "Массообменные процессы химической технологии", № 2, 1967.
3. Sherwod T.K., Woertz V.B. Ind. Eng. Chem., 31, No.7-8, 1944.
4. Семенов П.А. Журн. техн. физ., 14, № 7-8, 1944.
5. Кузьмин Н.Г., Малюсов В.А. Хим.пром.-сть, № 5, 1964.
6. Конобеев Б.И., Малюсов В.А., Жаворонков Н.М., Хим.пром.-сть, № 7, 1961.
7. Рой Д.К., Диссертация, МИХМ, 1963.
8. Алимов Р.З. ЖПХ, № 3, т. XXXV, 1962.
9. Николаев Н.А., Жаворонков Н.М. Хим.пром.-сть, № 4, 1964.
10. Ершов А.И., Гухман Л.М., ИФЖ, X, № 4, 1966.
- 11.
12. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.: Теоретическая гидромеханика, ГИТТЛ, 1955.
13. Ершов А.И., Плехов И.М. Авторское свидетельство № 910034/23-26.
14. Гухман Л.М., Ершов А.И., Плехов И.М. Изв. вузов - Энергетика.
15. Хоблер Т. Массопередача и абсорбция, Изд. Химия, 1964.
16. Николаев Н.А. Диссертация. Казань, 1965.

Белорусский технологический институт
им. С.М.Кирова

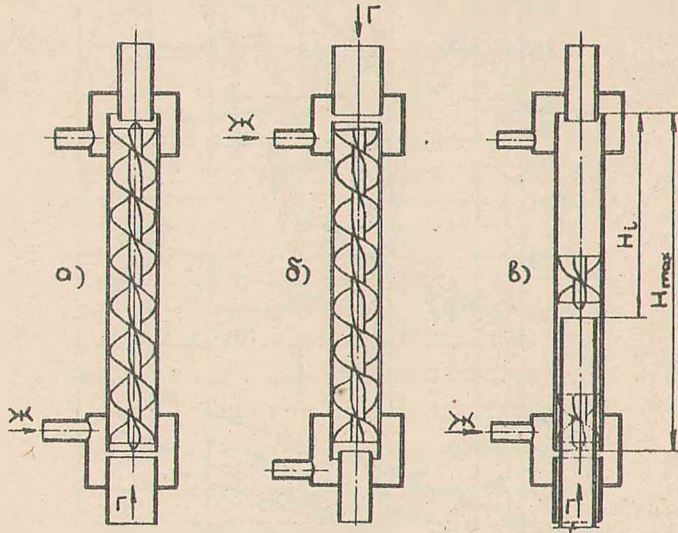


Рис.1. Конструкция контактных элементов.

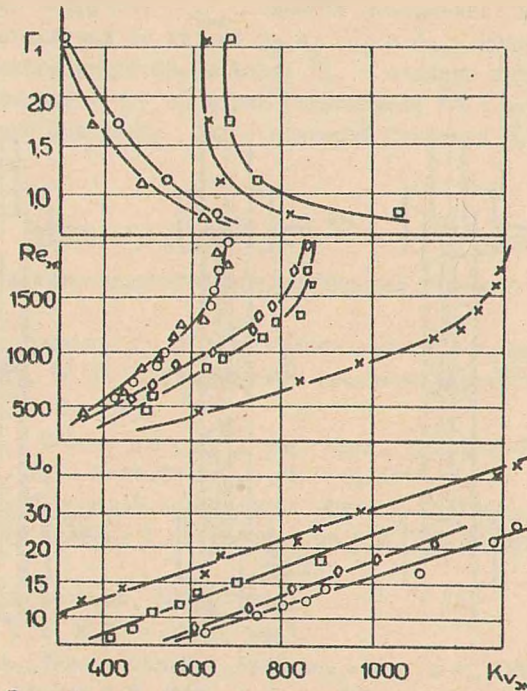


Рис.2. Зависимость $K_{V_{жк}}$ от скорости газа, режима движения жидкости и угла подъема винта для закрученного потока I-го вида.

	∇ - $U_0 = 8$	$Re_{жк} = 1420$	
$K_{V_{жк}} = f(\Gamma_1)$	\circ - $U_0 = 12$	$Re_{жк} = 850$	нисходящий поток
	\times - $U_0 = 12$	$Re_{жк} = 850$	
	\square - $U_0 = 12$	$Re_{жк} = 1120$	восходящий поток
$K_{V_{жк}} = f(Re_{жк})$	Δ - $D = 29$	$\Gamma_1 = 1,1$	$U_0 = 12,2$
	\circ - $D = 25$	$\Gamma_1 = 1,1$	$U_0 = 12,0$
	\times - $D = 20$	$\Gamma_1 = 1,1$	$U_0 = 13,6$
	\square - $D = 29$	$\Gamma_1 = 1,1$	$U_0 = 12,2$
	\diamond - $D = 25$	$\Gamma_1 = 1,1$	$U_0 = 12$
$K_{V_{жк}} = f(U_0)$	\times - $D = 25$	$Re_{жк} = 1420$	$\Gamma_1 = 2,6$
	\square - $D = 29$	$Re_{жк} = 1475$	$\Gamma_1 = 1,1$
	\diamond - $D = 25$	$Re_{жк} = 1420$	$\Gamma_1 = 1,1$
	\circ - $D = 25$	$Re_{жк} = 1420$	$\Gamma_1 = 1,76$

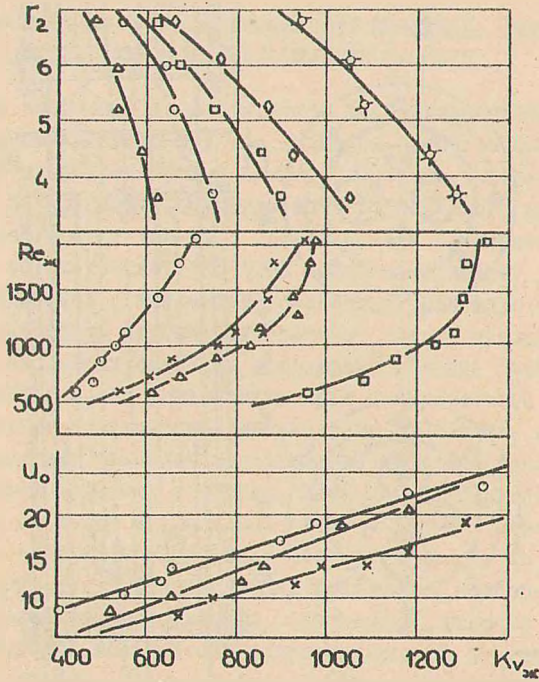


Рис.3. Зависимость $K_{V_{ж}}$ от скорости газа, режима движения жидкости и длины контактной трубки для закрученного потока II-го вида.

	∇ - $u_0 = 12$	$Re_{ж} = 700$	нисходящий поток
$K_{V_{ж}} = f(\Gamma_2)$	\circ - $u_0 = 10,2$	$Re_{ж} = 1420$	
	\square - $u_0 = 12$	$Re_{ж} = 1710$	
	\diamond - $u_0 = 10,2$	$Re_{ж} = 1420$	восходящий поток
	\diamond - $u_0 = 12$	$Re_{ж} = 1710$	
$K_{V_{ж}} = f(Re_{ж})$	\circ - $u_0 = 12$	$\Gamma_2 = 6,8$	нисходящий поток
	\times - $u_0 = 12$	$\Gamma_2 = 3,6$	
	\triangle - $u_0 = 12$	$\Gamma_2 = 6,8$	восходящий поток
	\square - $u_0 = 12$	$\Gamma_2 = 3,6$	
$K_{V_{ж}} = f(u_0)$	\circ - $Re_{ж} = 1420$	$\Gamma_2 = 6,8$	нисходящий поток
	\times - $Re_{ж} = 1420$	$\Gamma_2 = 3,6$	
	\triangle - $Re_{ж} = 1420$	$\Gamma_2 = 6,8$	восходящий поток

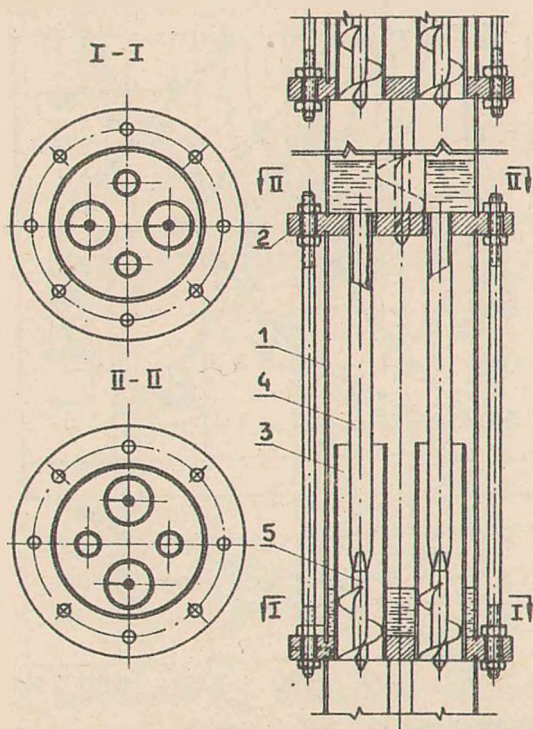


Рис. 4. Конструкция скоростного колонного аппарата. 1 - корпус аппарата; 2 - тарелка; 3 - контактный патрубок; 4 - сливная трубка; 5 - статический закручиватель.