

## Гидравлика Турбчато-Решетчатых Тарелок Уменьшенной Энергоемкости

Атауллаев О. Х., Очиллов Ш. Б.

Навоийский государственный педагогический институт

Атауллаев А. О.

Навоийский государственный горно-технологический университет

**ABSTRACT:** В статье излагаются результаты анализа шаровые тарелки с неподвижным и движущимся стабилизатором, крупноперфорированные тарелки, тарелки турбчато-решетчатые, как с перекрестным, так и с параллельным расположением труб (прутков) различного диаметра и проведено их сравнение. При этом теоретически установлено, что энергия шаровых тарелок в 2,66 раза больше дырчатых. А в действительности в 1,8 – 1,9 раз больше. Для турбчато-решетчатой тарелки коэффициент массопередачи в 2,75 раза больше, чем на шаровых тарелках.

В химической и нефтехимической технологии широкое применение для тепломассообмена и пылегазоочистки находят тарельчатые колонны, общий объем которых по металлоемкости и стоимости доходит до 30-40% от стоимости всего оборудования. Существенное значение при проектировании контактных устройств является уменьшение энергоемкости установок, поскольку на промышленных предприятиях приходится работать с большими расходами газа, достигающими в ряде случаев, сотен тысяч кубометров в час. В основу расчета уменьшения энергоемкости тарельчатых колонн необходимо положить энергетические закономерности процесса, где по нашим данным [1-5] интенсивность переноса вещества может быть описана зависимостью

$$k_y = k' \left( \frac{\Delta p w}{h \rho g F} \right)^m \quad (1)$$

где  $\Delta p$  – гидравлические сопротивления газожидкостного слоя;  $W$  – приведенная скорость газа;  $h$  – высота слоя жидкости, задержанной в системе;  $F$  – поперечное сечение слоя;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\rho$  – плотность жидкости.

В уравнении (1)  $\Delta p w$  – мощность потока газа в  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $h \rho g F$  – вес задержанной жидкости в Н;  $k'$  – опытный коэффициент. Соответственно уравнение показывает мощность газа, приходящуюся на один ньютон веса задержанной жидкости.

Приведенная зависимость вытекает из уравнения двух третей Колмогорова [6], имеющего вид

$$\Delta u^2 = k_0 \varepsilon^{1/2} \lambda_0^{5/3}. \quad (2)$$

В уравнении (2)  $\Delta u$  – мгновенная скорость пульсаций;  $\varepsilon=N/V\rho$  – диссипация энергии;  $N$  – мощность, поступающая в систему;  $V$  – объем жидкости;  $\lambda_0$  – масштаб пульсаций.

Поскольку в турбулентном потоке перенос вещества пропорционален интенсивности турбулентности, определяемой  $\Delta u$ , то можно принять, что

$$k_y = \varphi(\Delta u) \approx A\Delta u^m \quad (3)$$

Из сопоставления уравнений получим для двухфазного слоя

$$\varepsilon = \frac{\Delta\rho w}{h\rho gF}; k' = k_0\lambda_0^{2,5/3}$$

Уравнение (1) показывает, что для повышения переноса вещества при одинаковой затрате мощности газового потока необходимо уменьшать задержку жидкости на тарелке и увеличивать размер пульсаций в системе, причем последнее является наиболее интенсивным фактором.

Практически уменьшение  $h$  и увеличение  $\lambda_0$  достигается различными способами, к числу которых относится применение трубчато-решетчатых тарелок.

Трубчато-решетчатая тарелка, собранная из труб или прутков круглой стали, так что образуется решетка с прямоугольными отверстиями, является как бы системой из цилиндров (рис. 1).

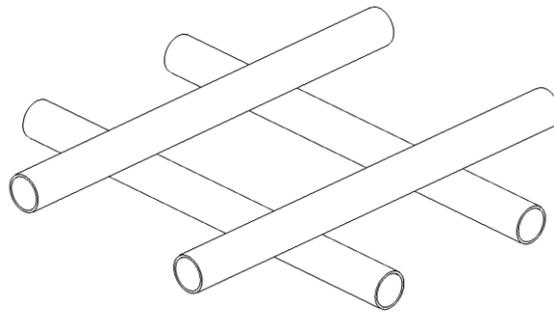


Рис. 1. Схема расположения труб на трубчато-решетчатой тарелке.

Соответственно в основу гидродинамики могут быть положены сведения по обтеканию цилиндров потоком воздуха или жидкости. За каждым цилиндром образуется гидродинамический след, состоящий из вихрей, средний размер которых можно считать приближается к диаметру цилиндра.

Наличие большого числа отверстий, созданных цилиндрами, определяет секционирование плоскости трубчато-решетчатой тарелки и, соответственно, однородность турбулизации, над поверхностью тарелки. Последнее подтверждается кривой распределения давления за тарелкой [7], имеющей очень небольшой максимум.

Построение плоскости тарелки из цилиндров (труб) определяет и вторую особенность данной конструкции – отсутствие струй газа, так как вся система представляется, как сочетание вихрей, создающихся за каждым цилиндром.

Третьей особенностью тарелки является уменьшение необратимой диссипации энергии газового потока из-за образования пульсаций небольшого размера, что происходит при движении струи через отверстие провальной тарелки с острыми кромками. Отсутствие острых кромок, создание однородного турбулизированного слоя над поверхностью тарелки, уменьшает гидравлические сопротивления системы.

Сочетание приведенных условий работы трубчато-решетчатых тарелок определяет большую турбулизацию газо-жидкостного слоя над ней, сравнительно с тарелками другого типа при одинаковой затрате мощности газового потока, и, соответственно, большую интенсивность тепломассопередача.

Дальнейшее определение условий увеличения переноса тепла и вещества на трубчато-решетчатой тарелке произведем считая, что оно определяется созданием вихревого отрывного движения газа (жидкости) при обтекании цилиндра. При таком движении определим среднюю кинетическую энергию вихря, используя зависимость [8] в виде уравнения

$$E_v = 0.152\rho\pi^2 \left(\frac{w_0}{d}\right)^2 R_v^2, \quad (4)$$

где  $W_0$  – скорость вихря;  $R_v$  – радиус вихря.

При турбулентном движении средняя кинетическая энергия составляет  $E_0 = \frac{w^2\rho}{2}$ .

Будем считать, что  $R_v = d, W = W_0$ .

Тогда

$$E_v = E_0 \cdot 0,304\pi^2 = E_0 \cdot 3,2 \quad (5)$$

Таким образом создание вихревого отрывного движения может увеличивать кинетическую энергию системы в 3,2 раза.

По данным [9] зависимость тепломассопередачи от турбулентности потока описывается уравнением

$$Nu' = Nu'_0 [1 + 0.032Tu\sqrt{Re}], \quad (6)$$

где  $Nu'$  - диффузионный критерий Нуссельта при заданной вихревой турбулентности;  $Nu'_0$  - диффузионный критерий Нуссельта при нулевой вихревой отрывной турбулентности;  $Tu = \frac{\sqrt{u_1^2}}{w}$  - степень турбулентности;  $u_1$  – пульсационная составляющая скорости;  $W$  – средняя скорость потока; критерий Рейнольдса.

Уравнение получено при поперечном обтекании трубы. В качестве примера произведем расчет  $Nu'$  при  $W=3$  м/с,  $Re=12600$ , принимая по [10]  $Tu=0.123$ , что соответствует условиям наших опытов при обтекании труб  $d=32$ мм,  $F_c=20.51\%$ . Подставив приведенные значения всех величин имеем  $Nu'=2,02 Nu'_0$ .

Полученные данные показывают, что на трубчато-решетчатых тарелках возможно увеличение интенсивности тепломассопередачи по сравнению с тарелками других типов и прежде всего провальных и колпачковых в 2-3 раза при одинаковой затрате энергии.

Определение гидродинамических и тепломассообменных характеристик трубчато-решетчатых тарелок производилось на системе вода-воздух в колонне квадратного сечения размером 265x265 мм. Подача воды регулировалась по показаниям ротаметров РС-7 с классом точности 1,5.

Температура воды и воздуха на входе и выходе определялась термометрами сопротивления с точностью записи  $\pm 0,5^0$  С. Дублирование показаний производилось лабораторными термометрами с точностью  $\pm 0,5^0$  С.

Расход воды измерялся ротаметрами РС-7.

Опыты ставились при скорости воздуха  $W=1-4$  м/с и плотности орошения в 30 и 50 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч.

<b>113</b>	ISSN 2690-9626 (online), Published by "Global Research Network LLC" under Volume: 4 Issue: 2 in Feb-2023 <a href="https://globalresearchnetwork.us/index.php/ajshr">https://globalresearchnetwork.us/index.php/ajshr</a>
	Copyright (c) 2023 Author (s). This is an open-access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC BY). To view a copy of this license, visit <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>

Испытывались тарелки пяти видов: 1 – провальные, выполненные из двойного ряда труб с перпендикулярным расположением их; 2 – с параллельным расположением двух рядов труб; 3 – провально-переливные трубчатые тарелки с дополнительным контактом фаз. Для сравнения опыты ставились также на дырчатых провальных тарелках с  $d_0=20$  мм и на тарелках со слоем псевдоожиженной орошаемой насадки. Характеристика тарелок приведена в табл. 1.

Значения гидравлических сопротивлений трубчато-решетчатых тарелок различного вида и дырчатой тарелки представлены в табл. 2.

Полученные данные показывают, что тарелки, собранные из труб диаметром 8мм имеют более высокие гидравлические сопротивления, сравнительно с тарелками, собранными из труб  $d=32$ мм, что зависит от большей площади, занятой трубами на  $1м^2$ . Увеличение  $\Delta\rho$  на тарелках с  $d=8$ мм составляет 16-29%.

Перекрестное расположение труб при,  $d=32$ мм увеличивает  $\Delta\rho$  из-за создания секционирования и более равномерного распределения газа, и жидкости по плоскости тарелки.

На тарелке провально-переливного типа с дополнительным контактом фаз наблюдается увеличение гидравлических сопротивлений на 40-50%, что определяется уменьшением свободного сечения тарелок до 7,5%.

Таблица 1. Характеристика тарелок

№ тарелки	Диаметр трубы мм	Свободное сечение, %	Взаимное расположение труб	Число рядов труб	Примечание
1	32	7,52	-	1	провально-переливная с дополнительным контактом фаз
2	32	8,20	перекрестное	1	
3	32	20,51	-	2	
4	32	31,45	-	2	
5	32	42,40	-	2	
6	8	20,51	-	2	
7	8	31,45	-	2	
8	8	42,40	-	2	
9	32	20,51	перекрестное	1	
10	32	20,51	-	1	со слоем псевдоожиженной насадки
11	-	20,51	Дырчатая тарелка с =20мм		
12	32	8,20	перекрестное	2	
13	32	8,20	перекрестное	2	
14	32	20,51	-		с трубами, имеющими сквозные отверстия Ø10мм

Обработка опытных данных позволяет получить эмпирическую зависимость гидравлического сопротивления от скорости газа  $W$ , плотности орошения  $L$ , свободного сечения тарелки  $F_c$ , диаметра трубы  $d_T$  и числа рядов  $n$  следующего вида

$$\Delta\rho = 3590w^{1.0}L^{0.52}F_c^{-1.29}d_T^{-0.28}n \quad (7)$$

Уравнение (7) имеет среднюю квадратичную погрешность в 5,2% для всех видов тарелок за исключением тарелки №1 провально-перекрестного типа. Для последней средняя квадратичная погрешность возрастает до  $\pm 14\%$ .

Таблица 2. Гидравлические сопротивления и высота динамического слоя трубчато-решетчатых тарелок различного вида

№ п/п	Вид тарелок	Скорость газа, м/с				Высота динамического слоя при $W=3 м/с$ мм
		1	2	3	4	
		$\Delta\rho_1$ Па				
$L=30 м^3/м^2ч$ . Тарелки с перекрестными трубами						
1	№3, $d_T = 32 мм, F_c = 20.51%$	450	810	1400	1800	400
2	№4, $d_T = 32 мм, F_c = 31.45%$	200	440	580	800	250
3	№5, $d_T = 32 мм, F_c = 42.40%$	140	300	500	600	220
4	№6, $d_T = 8 мм, F_c = 20.51%$	560	1200	1800	2100	450
5	№7, $d_T = 8 мм, F_c = 31.45%$	220	490	680	910	-
6	№8, $d_T = 8 мм, F_c = 42.40%$	200	470	620	-	-
$L=30 м^3/м^2ч$ . Тарелки с параллельными трубами						
7	№9, $d_T = 32 мм, F_c = 20.51%$ , 1 ряд труб	240	540	900	1250	350
8	№13, $d_T = 32 мм, F_c = 8.2%$ , 2 ряд труб	640	1350	2600	4000	-
9	№14, $d_T = 32 мм, F_c = 20.51%$ , 2 ряд труб с отверстиями по бокам	320	620	1200	1600	500
10	№11, $d_0 = 20 мм, F_c = 20%$ , дырчатая тарелка	550	1200	1800	2500	650
11	№10, $d_0 = 32 мм, F_c = 20.51%$ , со слоем насадки	800	1500	2100	2500	800
12	№1, $d_T = 32 мм, F_c = 7.52%$ , 1 ряд труб с дополнительным контактом фаз	900	1400	2050	-	350
13	№2, $d_T = 32 мм, F_c = 8.2%$ , 1 ряд труб	800	1600	2050	2500	800
$L=50 м^3/м^2ч$ . Тарелки с перекрестными трубами						
14	№3, $d_T = 32 мм, F_c = 8.2%$ , 1 ряд труб	570	1300	2000	2500	550
15	№4, $d_T = 32 мм, F_c = 31.45%$	250	530	710	940	350

Высота динамического слоя по физической сущности процесса должна быть связана с затратой энергии и чем больше будет эта затрата, тем больше будет и  $H_g$ , конечно до предела, когда струи газа начнут прорываться через газожидкостной слой.

Из соотношения кинетической энергии газа  $\mathcal{E}_k = W^2 \rho / 2$  и энергии, затрачиваемой на преодоление сопротивлений газожидкостного слоя  $\mathcal{E}_n = \Phi_1 \Phi_2 h \rho_{жг}$ , где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  поправки на влияние вязкости и поверхностного натяжения, можно определить, что

$$\frac{\mathcal{E}_k}{\mathcal{E}_n} = \frac{W^2 \rho}{2 h \rho_{жг} \Phi_1 \Phi_2} \quad (8)$$

Откуда  $h = \frac{\mathcal{E}_n}{\rho_{жг} \Phi_1 \Phi_2}$ , но  $\mathcal{E}_n$  по своей размерности является не чем иным как.

Принимая также, что  $A_1 = 1/\rho_{ж}g\Phi_1\Phi_2$  получим  $h = A_1\Delta\rho$  или высота динамического слоя

$$H_g = A'_1\Delta\rho, \quad (9)$$

где  $A'_1$  - опытный коэффициент.

По аналогии можно считать, что высота динамического слоя должна быть пропорциональна мощности газового потока. Тогда

$$H_g = A_2\Delta\rho \cdot W, \quad (10)$$

Построение графика  $H_g = \varphi(\Delta\rho \cdot W)$ , где  $\Delta\rho W$  имеет размерность  $\text{вт/м}^2$  показывает, что высота динамического слоя для тарелок № 2-14 описывается зависимостью

$$H_g = 0,12(\Delta\rho W)^{1,0} \left(\frac{F_{сб}}{F_{см}}\right)^{0,4}, \quad (11)$$

где  $F_{сб}$  и  $F_{см}$  – соответственно большее и меньшее свободное сечение. Численные значения высота динамического слоя при  $W=3 \text{ м/с}$  и  $L=30\text{м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  приведены в табл. 2. Они показывают, что во всех случаях  $H_g$  для трубчато-решетчатых тарелок меньше чем для дырчатой провальной тарелки. Одной из самых низкослойных тарелок является тарелка №1 с дополнительным контактом фаз.

Продольное перемешивание. Определение продольного перемешивания производилось импульсным методом. Трассером служил концентрированный раствор  $NaCe$ . Раствор из емкости вводился в колонну сжатым воздухом при давлении 0,4 МПа. Отбор проб производился с помощью чашечки, которая помещалась под тарелкой. Отобранная проба подводилась к датчику, для измерения электропроводности. Сигнал датчика подавался на вторичный прибор, которым служил автоматический мост типа КСМ-4 с классом точности 0,5. Показания датчика записывались на диаграммную ленту. По этим данным строилась кривая распределения  $E=\varphi(\square)$ . Расчет значений производился по известным формулам (11).

Исходя из опытного значения дисперсии  $\sigma^2$  определялся критерий Пекле перемешивания по зависимости

$$Pe'_m = \frac{3}{\sqrt{1+3(\sigma^2-1)}} \quad (12)$$

Численные значения  $Pe'_m$  для тарелок №1,2,3,6,11 при одинаковой скорости газа и плотности орошения находятся в пределах 4,5-7,6, т.е. во всех случаях наблюдается приближение к полному перемешиванию.

### Выводы:

1. Показано, что трубчато-решетчатые тарелки по своей гидродинамике заметно отличаются от других видов тарелок.
2. Установлено, что на таких тарелках возникает усиленная турбулизация из-за возникновения отрывных вихрей, при уменьшенных гидравлических сопротивлениях.
3. На основе расчетов установлено, что интенсивность турбулизации на трубчато-решетчатых тарелках в 2-3 раза больше чем на тарелках других видов, что позволяет считать возможность заметного увеличения тепломассопередачи на таких тарелках.

Последнее показано в дальнейших наших опытах.

4. Одним из условий увеличения интенсивности турбулизации является создание секционирования в виде отдельных ячеек, образованных перпендикулярным расположением двух рядов труб.

<b>116</b>	ISSN 2690-9626 (online), Published by "Global Research Network LLC" under Volume: 4 Issue: 2 in Feb-2023 <a href="https://globalresearchnetwork.us/index.php/ajshr">https://globalresearchnetwork.us/index.php/ajshr</a>
	Copyright (c) 2023 Author (s). This is an open-access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC BY). To view a copy of this license, visit <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>

5. Получены расчетные уравнения для определения гидравлических сопротивлений и высоты динамического слоя. В последнем случае использованы энергетические закономерности.

**Литература**

1. Ataullaev O.Kh., Ataullaev A.O., Bisenova B.T. Energy Aspects of Wet Dust Collection Processes // The Seybold Report Journal (TSRJ) V17. I 12. 2022. Amerika: - PP. 451-461.
2. Атауллаев О.Х. Тарелки со слоем псевдооживленной насадки и без неё уменьшенной энергоемкости // Монография, Навои. 2021. 108 с.
3. Атауллаев О.Х., Бахронов Х.Ш., Собиров Б.Б. Исследование пленочных теплообменных процессов // Материалы «ISTIQLOL» (Нетрадиционные технологии добычи и переработки полезных ископаемых – прогресс горной науки XXI века), г. Навои, 2000 г., - С. 13.
4. Атауллаев О.Х. К определению параметров насадки, характеризующих массоотдачу для трехфазного псевдооживленного слоя // Материалы «ISTIQLOL» (Нетрадиционные технологии добычи и переработки полезных ископаемых – прогресс горной науки XXI века), г. Навои, 2000 г., - С. 135-137.
5. Атауллаев О.Х. О влиянии диаметра колонны и вида насадки на гидродинамику абсорбера с псевдооживленным слоем орошаемой насадки // Материалы «ISTIQLOL» (Нетрадиционные технологии добычи и переработки полезных ископаемых – прогресс горной науки XXI века), г. Навои, 2000 г., - С. 139-140.
6. Атауллаев О.Х. Элементы гидродинамики слоя кольцевой псевдооживленной насадки в колоннах различного диаметра // Материалы «ISTIQLOL» «Актуальные задачи современных горно-технологических комплексов и пути их решения», Навои. 26-28 сентября 2002. С. 74.
7. Атауллаев О.Х., Усмонова С.Т. Исследование абсорбционного метода улавливания легколетучих растворителей из паровоздушной смеси // Материалы «Значение технологического образования в подготовке молодежи к профессии и проблемы и пути ее решения» - Нукус, 19 ноября 2021 г. - С. 17.
8. Атауллаев О.Х., Полвонов Н.О., Атауллаева З.О. Исследование влияние вида тарелок на интенсивности переноса вещества // Материалы VIII-Международной научно-технической конференции горно-металлургический комплекс: «Достижения, проблемы и современные тенденции развития». - Навоий. – 2015. С. 418-419.
9. Атауллаев О.Х., Бесинова Б.Т. Некоторые вопросы гидравлики истечения жидкости через треугольный перелив пленочных тарелок // Материалы «Значение технологического образования в подготовке молодежи к профессии и проблемы и пути ее решения» - Нукус, 19 ноября 2021 г. -С. 15-16.
10. Атауллаев О.Х., Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Интенсификация теплообмена в выпарных аппаратах с кипением в трубах // Материалы международной научно-технической конференции «ИННОВАЦИЯ-2003», Ташкент. 22-24 октября 2003. С.135-136.
11. Achilov Sh.B. Technologies for the development of student environmental competence in extracurricular activities // Jilin Daxue Xuebao / Journal of Jilin University, China. 2022 y. P. 633-645.