

УДК 532.546.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВУХФАЗНОГО ПРОТИВОТОЧНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ АППАРАТА В БАРБОТАЖНЫЙ РЕЖИМ

Кузьменко И.Н.

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», Киев, Украина*

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены математическая модель перехода контактных аппаратов в критический режим работы – захлебывание и верификация этой модели для расчета противоточного насадочного аппарата, например абсорбера. Модель описывает взаимосвязь между скоростями воздушного потока

и воды и учитывает влияние теплофизических свойств и геометрии устройства. Отклонение расчетных и экспериментальных данных составляет до 20%, поскольку модель не учитывает полноты формирования пленки на поверхности насадки струйным оросителем.

ВВЕДЕНИЕ

В химической, нефтяной технике и энергетике применяются контактные теплообменные аппараты без разделяющей перегородки. Благодаря отсутствию перегородки удается реализовать массообмен или интенсифицировать теплообмен. Однако, в таких аппаратах протекают сложные гидродинамические процессы.

В частности, в зависимости от расходов потоков в аппарате различают следующие гидродинамические режимы движения - пленочный, подвисяние, захлебывание (барботаж), вынесение жидкости [8]. При этом переход к захлебыванию в пленочных аппаратах рассматривается как критический режим, который ограничивает их работу. Поэтому задача исследовать и описать захлебывание, как критический режим является важной и актуальной.

Изучение захлебывания основывается на экспериментальном исследовании [6-8], что всегда ограничено параметрами установки. А известные аналитические работы [2,4,5], по захлебыванию строят на теории гладкой пленки [2] или пленки с волнами [4,5]. Последний вариант является полуэмпирическим, т.е. - для решения уравнений нужны экспериментальные значения. И потому является определенной мерой ограниченным. Теория гладкой пленки является более простой и строится на уравнении баланса сил

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{S}{A} \tau_0 + G \frac{du}{dz} + \rho g \sin \theta$$

при условии постоянства плотности ρ и скорости потока u . Здесь p - давление в данной точке поперечного сечения на расстоянии z , τ_0 - касательное напряжение на стенке канала, периметром

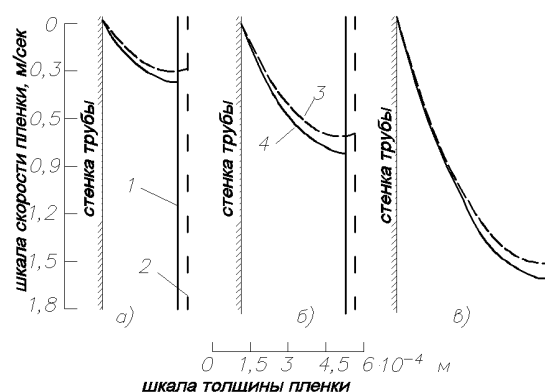


Рис.1. Влияние касательных сил воздушного потока на распределение скоростей в пленке жидкости. Данные [2] (а - расход воды 27,2 кг/ч; б - 83,7 кг/ч; в - 227 кг/ч; сплошная прямая - спокойное течение пленки (1) с локальной скоростью (4); пунктирная линия - пленка (2) в момент захлебывания с локальной скоростью (3).

S , θ - угол наклона канала к горизонту, A - площадь поперечного сечения.

Т.е., давление в канале снижается (левая часть уравнения) за счет трения, ускорения движения и силы гравитации (правая часть уравнения). В дальнейшем задачей исследователей является определение этих трех составных, зависящих от скоростей потоков и их расходов.

В свою очередь расчеты скорости и толщины пленки приведены в [2] и показаны на рисунке 1. При этом каждой скорости пленки отвечает две толщины пленки - меньшая (сплошная прямая), рассчитанная при спокойном движении пленки без потока воздуха, и большая (пунктирная линия) – рассчитанная непосредственно перед захлебыванием и обусловленная силой трения о воздух. Из рис.1 видно, что, независимо от толщины пленки, сила трения влияет на пленку, изменяя эпюру локальных скоростей в ней и ее толщину. Тем не ме-

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Таким образом, задачей данной работы является разработка модели для расчета критического режима - захлебывания контактных теплообменных аппаратов, при котором происходит интенсивное вынесение жидкости. Задача включает создание и верификацию модели, определение влияния расходов жидкости и газа, а также геометрии контактного аппарата на переход в критический режим.

Формулировка математической модели

Будем считать заданными: расход воздуха G_{air} , кг/с,

удвоенный замерянный периметр насадки p , м.

Примем, что теплофизические параметры вязкость, плотность воды и воздуха являются постоянными и зависят лишь от температуры, а движение пленки рассчитываем по формулле стекающей пленки Нуссельта [1].

Задачей является определение расхода воды G , кг/с при критическом режиме.

Рассмотрим параметры водного потока. Определяем эквивалентный диаметр канала $de = 4f / p$, м, где $f = \pi D^2 / 4$, м – площадь поперечного сечения канала.

Определяем линейную плотность орошения рассчитанного канала водой $\Gamma = G / p$, кг/(с м).

Рассчитаем толщину пленки воды δ . Для этого рассмотрим уравнение средней скорости пленки в постановке Нуссельта

$$v_{ср_пл} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} v dy = \frac{1}{3} \frac{\rho g}{\mu} \delta^2.$$

С другой стороны, на основе уравнения неразрывности, записанном для пленки воды в форме $G = v_{ср_пл} \cdot \rho \cdot F$, где $F = p\delta$, получаем

$$\delta = \left(\frac{3v\Gamma}{g\rho} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Рассчитаем касательное напряжение, обусловленное силой трения пленки воды о поток воздуха. В общем случае касательное напряжение определяется зависимостью

нее, авторы экспериментов не смогли связать толщину пленки, касательное напряжение на границе пленка-воздух и захлебывание, поскольку, по их выводу, силы трения, которая входит в состав касательного напряжения, недостаточно, чтобы остановить пленку. Т.е., авторы были близкими к формулированию модели. Попробуем использовать их подход, учитывая, что касательное напряжение останавливает движение не всей пленки жидкости, а лишь минимальной ее части, сравнимой с точностью исследований.

$$\tau_{пл} = -\mu_{пл} \left(\frac{\partial v_{пл}}{\partial y} \right), \text{ Па.}$$

На основе уравнения локальной скорости пленки в постановке Нуссельта определим значение производной

$$\frac{\partial v_{пл}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\rho g}{\mu} \left(\delta y - \frac{y^2}{2} \right) \right] = \frac{\rho g}{\mu} (\delta - y).$$

$$\text{Т.е., } \tau_{пл} = -\rho g (\delta - y).$$

В дальнейшем рассмотрим движение второго потока - воздуха в канале.

Скорость воздуха $w_{air} = G_{air} / (\rho_{air} \cdot f)$, м/с.

Считая, что потоки идут параллельно и проход потока воздуха уменьшается на значение толщины пленки, получаем $R_0 = d / 2 - \delta$.

Рассматривая поток воздуха как послойное ламинарное течение в цилиндрической трубе круглого сечения (течение Гагена-Пуазейля), что описывается уравнением

$$v_{air_локальн} = 2w_{air} \left[1 - \left(\frac{R}{R_0} \right)^2 \right],$$

запишем максимальную скорость, которая отвечает середине потока

$$R = R_0 \quad v_{air_max} = 2w_{air}.$$

Рассчитаем касательное напряжение, обусловленное силой трения потока воздуха о пленку воды

$$\tau_{air} = -\mu_{air} \left(\frac{\partial v_{air}}{\partial y} \right), \text{ Па.}$$

Если учесть, что скорость у пленки при подвигании, за которым следует захлебывание - отсутствует

$$\frac{\partial v_{air}}{\partial y} = \frac{v_{air_max} - v_{R=0}}{R_0 - 0} = \frac{v_{air_max}}{R_0}$$

то можно определить среднее значение касательного напряжения между потоком воздуха и пленкой воды в критическом режиме

$$\tau_{air} = -\mu_{air} \frac{v_{air_max}}{R_0} \Rightarrow -\mu_{air} \frac{2w_{air}}{R_0}$$

С другой стороны, при движении в критическом режиме, силы трения потока воздуха о пленку жидкости и пленки жидкости о поток воздуха должны быть равны и противоположными за вектором (согласно 3 закону механики Ньютона). Т.е., учитывая равенство площади контакта, запишем равенство касательных напряжений на поверхности пленки. Или, что есть тоже, на поверхности потока воздуха $\tau_{air} = \tau_{пл}$.

Упростим выражение

$$\mu_{air} \left(\frac{\partial v_{air}}{\partial y} \right) = \rho g (\delta - y) \Rightarrow \delta - y = \frac{\mu_{air}}{\rho g} \frac{2w_{air}}{R_0}$$

Таким образом, в критическом режиме поток воздуха создает критический слой, толщиной $\Delta_{пл} = \delta - y$ в пределах пленки жидкости. И это, собственно, характеризует переход к такому режиму. Из последней зависимости определим толщину этого критического слоя

$$\Delta_{пл} = \frac{\mu_{air}}{\rho g} \frac{2w_{air}}{R_0}$$

Т.е., сформулируем следующим образом - как только касательное напряжение на границе пленка-воздух формирует критический слой в пленке, режим движения потоков изменяется - начинается т.н. подвисяние пленки, за которым следует захлебывание.

Верификация предложенной модели

Проверим данные выкладки практически - рассмотрим экспериментальные данные [3], полученные в сетчатой насадке, показанной на рис.2 Исследовано три типоразмера насадок с разным пери-

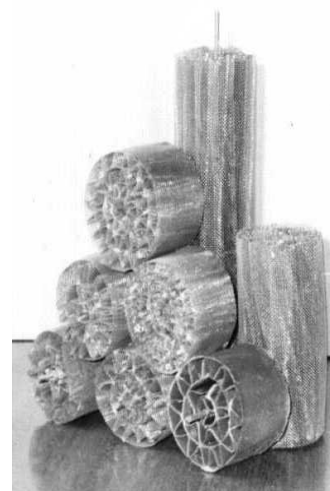


Рис.2. Сетчатые насадки, как поверхность контакта.

метром и, соответственно, эквивалентным диаметром. При этом диаметр поперечного сечения трубы без насадки составлял 56 мм, а высота трех исследованных насадок не изменялась и составляла 40 мм.

Исследование критического режима („захлебывания“) проводилось при постоянном расходе воды и постепенном росте расхода воздуха. Переход к критическому режиму фиксировался по существенному росту аэродинамического сопротивления. Орошение насадки проводилось струйным оросителем, закрепленным на определенном расстоянии. Исследование и результаты расчетов приведены в таблице 1.

№ п/п	Замерянные данные		Рассчитанные данные						
	Расход воды, кг/ч	Расх. в., G_{air} кг/ч	p , м	de , мм	Γ , г/(м с)	Толщ. пл., мм	Скор. пл., мм/с	Ск. в., w_{air} м/с	Касат. напр. τ , Па
1	27,4	1,8	3,077	3,202	2,47	0,091	27,2	0,163	0,0038
2	63,2	9,2	2,155	4,571	8,15	0,136	60,2	0,832	0,0136
3	109,1	8,5	- " -	- " -	14,06	0,163	86,6	0,769	0,0127
4	156,5	8,25	- " -	- " -	20,17	0,184	110,1	0,746	0,0125
5	200	8,05	- " -	- " -	25,78	0,199	129,7	0,728	0,0123
6	257	7,7	- " -	- " -	33,12	0,217	153,3	0,696	0,0118
7	63,2	18	1,473	6,69	11,92	0,154	77,5	1,628	0,018
8	109,1	17,25	- " -	- " -	20,57	0,185	111,6	1,56	0,0174
9	156,5	16,75	- " -	- " -	29,51	0,208	141,9	1,515	0,017
10	200	16,25	- " -	- " -	37,72	0,226	167,2	1,47	0,0166
11	157	15,4	- " -	- " -	48,46	0,246	197,6	1,393	0,0158

Таблица 1. Результаты верификации модели

Рассмотрим диапазон точек 2-11 табл. 1, для которых плотность орошения изменяется в диапазоне 8-48 г/(м с) или в 6 раз. При этом, скорость воздуха варьируется от 0,7 до 1,6 м/с - практически вдвое. Аналогично изменяется и рассчитанное значение толщины пленки. Тем не менее, если обратить внимание на касательное напряжение, которое изменяется в диапазоне 0,012-0,018 Па, то диапазон его изменения составляет 33%, или $\pm 16,5\%$

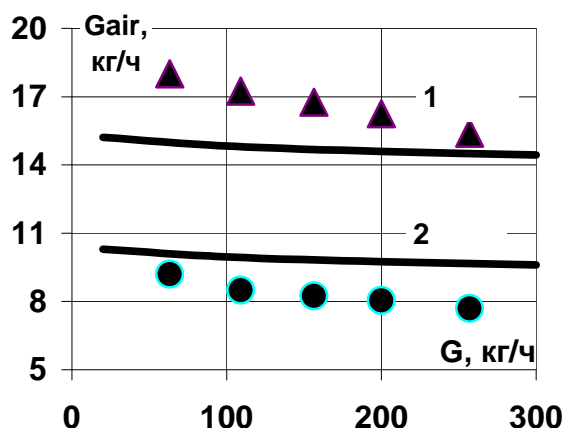


Рис.3. Зависимость массового расхода воздуха от массового расхода воды $G_{air} = f(G)$ при разных значениях периметра насадки p в критическом режиме (1 – периметр составляет 1,473 м, 2- 2,155 м). Точками помечены данные замеров.

Кроме этого, если учесть, что погрешность определения плотности орошения составляет 3,1% [8], то в пределах данной погрешности можно определить касательное напряжение, при котором пленка жидкости начинает движение сонаправлено с потоком воздуха, т.е. возникает критический слой. Однако, точка 1 (табл. 1) имеет значение касательного напряжения в несколько раз меньшее, чем другие. Это указывает на сложность изучения данного режима и его многофакторность. В частности, поскольку пленка воды на поверхности насадки формируется струйным оросителем, на поверхности насадки существуют сухие места. При этом их размеры прямо зависят от расхода воды и периметра насадки. Исходя из этого, точку 1 не будем учитывать.

Таким образом, в пределах точности эксперимента установлено значение касательного напряжения $\tau = 0,015$ Па, которое создает сонаправленный режим движения воздушного потока и части пленки при противоточном движении.

На рисунке 3 показана зависимость расхода воздуха от расхода воды при критическом режиме. Расчеты проведены для трех типов насадки – с раз-

ным периметром p , рассчитанным как удвоенный физический периметр насадки. При этом поперечное сечение не изменялось и составляло $D = 56$ мм.

Исходя из рис.3, видно, что более загроможденное сечение, с большим периметром насадки p , переходит к критическому режиму при низких расходах воздуха. В частности, при постоянном расходе жидкости возрастание периметра от 1,473 до 3,077 м (практически вдвое) приводит к такому же - двукратному уменьшению критического расхода воздуха. Например – при $G = 100$ кг/г G_{air} изменяется от 14,84 до 6,82 кг/ч.

Кроме этого на рис.3 показано сравнение результатов расчетов G_{air} , как функции

$$G_{air} = f(G, p, D)$$

с результатами экспериментальных исследований [3].

Как видно отклонение экспериментальных данных от рассчитанных, в наихудшем случае ($G = 63,2$ кг/ч, $p = 1,473$ м) составляет

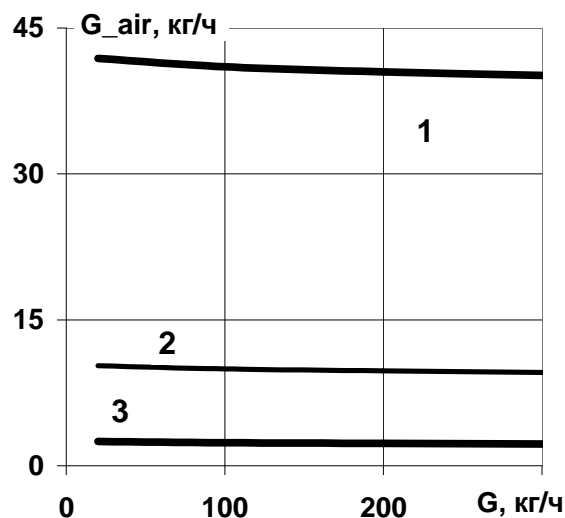


Рис.4. Зависимость массового расхода воздуха от массового расхода воды $G_{air} = f(G)$ при разных значениях поперечного сечения канала D в критическом режиме (1 - $D = 112$ мм, 2 – 56 мм, 3 – 28 мм).

$$\delta = \frac{18 - 15}{15} 100\% = 20\%$$

Как указывалось выше, это объясняется качеством формирования пленки на поверхности насадки при помощи струйного оросителя. Из рис.3 также

видно, что все графики, независимо от значения периметра p , являются эквидистантными. Это свидетельствует об одинаковом характере процессов, которые протекают при переходе аппарата в критический режим, независимо от типа насадки и влияния струйного оросителя.

На рис.4 показана зависимость массового расхода воздуха от массового расхода воды $G_{air} = f(G)$ при разных значениях поперечного сечения канала D в критическом режиме.

При этом эквивалентный диаметр $de = 4,57$ мм остается постоянным за счет корректировки периметра p , согласно выражению $de = \pi D^2 / p$. (например, при $D = 28$ мм, периметр составляет $p = 0,539$ м). Моделирование проведено в диапазоне расходов воды $G = 20...300$ кг/ч. Как видно из рис.4 рост сечения канала приводит к возрастанию расхода воздуха в критическом режиме. При этом зависимость между критическим расходом воздуха и

сечением канала носит квадратический характер. Например, рост сечения вдвое с 56 до 112 мм приводит к возрастанию расхода воздуха в четыре раза – с 9,96 до 41,02 кг/ч (при $G = 100$ кг/ч). Т.е., основным способом увеличить пропускную способность пленочного аппарата по газу – является увеличение его поперечного сечения. Данная зависимость справедлива при постоянных эквивалентном диаметре и степени влияния оросителя.

Как видно из рис.3 – 4, переход к критической скорости практически не зависит от расхода жидкости G , или плотности орошения Γ , если не учитывать степени влияния оросителя на формирование площади занятой пленкой. Т.е., за счет касательного напряжения на границе деления двух фаз – воздуха и воды – для перехода к критическому режиму практически достаточно лишь малой частицы всей той воды, которая движется в виде пленки.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в представленной работе:

- предложена математическая модель, основанная на расчете касательного напряжения на границе „поток газа - пленка жидкости”. Учитывается, что именно за счет силы трения (как составляющей касательного напряжения) происходит остановка стекающей поверхности пленки, что и вызывает переход к критическому режиму.

- максимальное отклонение расчетов от экспериментальных результатов составляет 20%. Это объясняется тем, что модель не учитывает влияние оросителя на формирование площади контакта в аппарате.
- рассмотрено влияние на расход воздуха в критическом режиме периметра насадки, диаметра аппарата, расхода жидкости. Приведенные аналитические выкладки в дальнейшем следует подкрепить экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.М.Василенко, А.І.Українець, В.В.Олішевський. Основи тепломасообміну,- К. НУХТ, 2004 – 250 с.
2. Хьюитт Дж, Холл-Тэйлор Н. Кольцевые двухфазные течения - М. Энергия, 1974, -350 с.
3. Дикий М.О., Колоскова Н.Ю., Кузьменко І.М., Ель-Таллаа А.А. Теплообмін і гідродинаміка в протитокових насадкових контактних випарувачах // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – сер. Теплоенергетика. – 1997. – С. 31-33.
4. Безродный М.К. О предельных режимах области устойчивого восходящего течения пленки жидкости и потока газа или пара в вертикальных трубах и каналах // Пром. теплотехника. – 2002. – Т. 24 - №4. С. 31-37.
5. Безродный М.К. Границы устойчивости волнового течения пленки, соприкасающейся с вос-

ходящим потоком газа // Пром. теплотехника. – 2002. – Т. 24 - №6. - С. 66-76.

6. Н.А.Дикий, Н.Ю.Колоскова, В.И.Шкляр, В.В.Дубровская Разработка и исследование конденсатора смешивающего типа с пористой насадкой //Пром. теплотехника. – 1992. – Т. 14 - №1-3. С. 11-15.
7. Дубровская В.В., Орлянский В.В., Колоскова Н.Ю., Шкляр В.И. Предельные скорости сред в противоточных газожидкостных системах // Пром. теплотехника. – 1998. – Т. 20 - № 1. С. 58-63.
8. Кузьменко І.М. Гідродинаміка та тепломасообмін в протитоковому контактному випарувачі з сітчастою гофрованою насадкою // Дис. к.т.н., К НТУУ „КПІ”, 2003- 151 с.