

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ В ПОТОКЕ ГАЗА

А.Лесбаев, М.Серимбетов
ЮКГУ им. М.Ауезова, г.Шымкент

Система, где газ – сплошная фаза, а жидкость – дисперсная, создается над барботажным слоем, в котором по мере увеличения скорости газа все большая часть жидкости переходит в капли. Полное превращение жидкости в капли наблюдается в скрубберах Вентури, в полых скоростных скрубберах с распылением жидкости форсунками, колоннах с псевдооживленным слоем орошаемой насадки, работающих при скоростях больше 8 м/с. Механизм вторичного дробления жидкости, т.е. дробления под действием потока газа, несмотря на большое количество работ в этой области [1-4], еще недостаточно изучен.

В настоящей статье дается критический обзор известных подходов к моделированию системы капель в потоке газа.

В работах [3, 4] утверждается, что капля разрывается в потоке газа, когда сила трения газовой струи превышает силу поверхностного натяжения. При этом образуются более мелкие капли, диаметр которых

$$d = We_{кр} \frac{\sigma}{W^2 \rho} \quad (1)$$

Критерий $We_{кр}$ принимается равным 12 [5]. Влияние вязкости начинает сказываться, когда микромасштаб турбулентности λ_0 приближается по величине к диаметру капли:

$$\lambda_0 = 4n \nu^{0.5} \varepsilon^{0.5}, \quad (2)$$

где ε - диссипация энергии.

Дробление капель на более мелкие капли в потоке газа по [5] начинается при диаметре капель больше $0,6 \div 0,7$ см.

Граница устойчивости капли определяется критерием Вебера

$$We = \frac{W^2 d_{кан} \rho}{\sigma} \quad (3)$$

и числом устойчивости

$$\Gamma = \frac{2\mu_{ж}}{d_{кап}\rho_{ж}\sigma} \quad (4)$$

Для маловязких жидкостей основную роль играет число Вебера.

Приведенные закономерности установлены при изучении распыления жидкости в форсунках, при исследовании дробления капель в газовом потоке.

Вместе с тем, по нашему мнению, полностью обоснованного численного значения $We_{кр}$ в литературе нет. Наш анализ показал, что по разным данным, при дроблении капель различных жидкостей $We_{кр} = 5 \div 14$.

Скорость газа, при которой капли ($d_{кап} = 1,5 \div 2$ мм) жидкости устойчивы против дробления потоком газа, рассчитывается по $We_{кр} = 5 \div 7$, или по $We_{кр} = 5 \div 12$ [5].

Вводя в расчет $We_{кр} = 5,4$, мы получили, что максимальный критический диаметр капли равен 6,5 мм и такая капля устойчива при W до 6 м/с. По данным [6], максимальный диаметр капли находится по зависимости $We_{кр} = 12$.

В работе [7] на основании закономерности дробления средний диаметр капли находится по зависимости:

$$\frac{d_{кр}}{\lambda} = l_1 \left(\frac{W^2 l \rho}{\sigma} \right) \quad (5)$$

В качестве определяющего размера принимается капиллярная постоянная $\lambda = \sqrt{\sigma/\rho}$.

На основании теоретических положений [7] максимальный размер капли в потоке газа определяется по зависимости:

$$d_{кап}^{max} = Const \frac{\sigma^{0.6}}{(E/V)^m \rho^{0.3}} \quad (6)$$

Теоретически $m = 0,4$, в скруббере Вентури $m = 0,7$, в насадочной колонне $m = 0,62$.

Дробление капель в пульсационных и вибрационных колоннах удовлетворительно описывается уравнением (6), если принять $Const = 0,24$.

Теоретическим анализом [6] установлено, что дробление капли турбулентными пульсациями описывается зависимостью

$$\frac{d}{\lambda} \approx We^{-(0.5+0.1)} \approx \left(\frac{\sigma^{0.5}}{W} \right)^{1.0+0.2}, \quad (7)$$

где $We = \frac{U^2 d_{кап} \rho}{\sigma}$ - число Вебера; W - скорость потока; U - скорость капли.

Средний размер капель увеличивается пропорционально коэффициенту вязкости в степени 0,25 и $\sigma^{-(0,6+1,0)}$.

Для расчета диаметра капли в [8] приводится эмпирическая зависимость:

$$d_{кан} = \frac{1,83}{\Delta W} \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma}} \quad (8)$$

Мы рекомендуем следующую зависимость:

$$1,69W^2 = \frac{\sigma}{d_{кан}} + 1,3 \frac{\mu_c}{d_{кан}} W \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_c}} \quad (9)$$

Наиболее удовлетворительное описание процесса дробления жидкости газом дает следующее уравнение, позволяющее определить максимальный диаметр капли:

$$d_{кан} = \frac{A}{W} + B_k^{1,5}, \quad (10)$$

где $A = 586 \sqrt{\sigma/\gamma_{жс}}$; $B_k = 597 (\mu_{жс} / \sqrt{\sigma \mu_{жс}})^{0,45}$.

По [9] средний диаметр капли, рассчитанный по (10), хорошо согласуется с экспериментальными данными. Минимальный размер капель на два порядка меньше максимального. Исходя из обычных закономерностей дробления, средний диаметр капли определяется по зависимости:

$$\frac{d_{кан}}{\lambda} = C_1 We^{0,5}, \quad \text{где } \lambda \approx \sqrt{\sigma/\gamma}. \quad (11)$$

Подставив в We значение ℓ , можно установить, что $d_{кан} = C_2 W^{-1}$, т.е. средний диаметр капли обратно пропорционален скорости воздуха.

По данным [5] средний диаметр капли, которая образуется над газожидкостным слоем в случае ситчатой тарелки, описывается уравнением:

$$\frac{d_{ср}}{\lambda} = 5,0 \left(\lambda W_{от} \frac{\rho_{жс}}{\mu_{жс}} \right)^{0,35} \left(\frac{\mu_{жс} W_{жс}}{\sigma} \right)^{-0,2}, \quad (12)$$

где $W_{от}$ - относительная скорость газа и жидкости; $\lambda = 2d_0 \div 1,5d_0$; d_0 - диаметр отверстия.

Исследования [8, 9] показывают, что лучшее приближение к действительному размеру капель жидкости в слое псевдооживленной орошаемой насадки наблюдается при расчете по уравнению (6) в случае $m = 0,31$.

Средний размер капель, образующихся в трубах Вентури, рекомендуется определять по уравнению:

$$d_{кан} = \frac{585 \cdot 10^{-3} \sqrt{\sigma}}{W \sqrt{\rho_{жс}}} + 440 \left(\frac{\mu_{жс}}{\sqrt{\rho_{жс} \sigma}} \right)^{0,45} \left(\frac{V_{жс}}{V_{отг}} \right)^{1,5}, \quad (13)$$

где $\rho_{жс} = 700 \div 1200 \text{ кг/м}^3$; $\sigma = 19 \cdot 10^{-3} \div 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$; $W = 100 \div 300 \text{ м/с}$.

Ошибка становится значительной в случае $W < 30 \text{ м/с}$.

Причина дробления капли в потоке газа заключается в том, что давление на лобовую часть капли значительно больше, чем на кормовую. Вследствие этого капли сплющиваются,

приобретая куполообразную форму, а затем дробятся на мелкие капли. Для каждого диаметра капли существует нижний режим (режим раздвоения) и верхний режим (режим распыла) предела устойчивости. Определение поверхностно-объемного диаметра капли в пульсационных экстракционных колоннах позволило установить зависимость, количественно подтверждающую основные факторы, влияющие на размер капли.

В работе [10] установлено, что объемно-поверхностный диаметр капли, выходящей с вращающегося диска, зависит от таких факторов, как плотность, скорость, поверхностное натяжение. Исследование размеров капли, образующихся в вихревой распылительной колонне, позволило получить функциональную зависимость:

$$\frac{d}{d_{\text{крит}}} = f\left(\frac{W^2 d \rho}{\sigma}, \frac{\mu_{\text{ж}}}{d_{\text{крит}} \sigma \rho_{\text{ж}}}, \frac{G_{\text{ж}}}{G}\right) \quad (14)$$

где σ , Н/м; ρ_c, ρ_j , кг/м³; μ_c , Пас.

Размер капель при дроблении жидкости турбулентным газовым потоком определяется по зависимости, выведенной на основании теории Колмогорова:

$$d_{\text{крит}} \approx \left(\frac{\lambda \sigma}{\rho_{\text{ж}} W_0^2}\right)^{0,5} \quad (15)$$

где ℓ - геометрический размер, например, диаметр отверстия в тарелке; W_0 - истинная скорость газа в зоне распыла.

В исследовании [11] получено математическое описание движения полидисперсной двухфазной среды с учетом дробления и выведен критерий дробления в виде числа Вебера. Приведенные зависимости составляют широкий спектр уравнений, из которых наиболее теоретически обоснованными являются уравнения Колмогорова. Существуют различия в оценке критического значения числа Вебера, соответствующего условиям дробления. Все это позволяет сделать некоторые выводы, связанные с дроблением и витанием капель в газовом потоке, представленные в последующих главах.

Распределение капель при разрушении элемента жидкости по размерам или массе, несомненно, должно сказываться на интенсивности газо- и пылеулавливания. Такое распределение при распылении жидкости в форсунках рассматривается в многочисленных исследованиях [1-9]. В работе [11] показывается, что распределение капель по размерам одинаково при дроблении пленки, сходящей с края пластинки и в случае распыления пневматическими форсунками.

В большинстве исследований авторы приходили к выводу, что распределение капель по размерам соответствует нормальному или нормально-логарифмическому закону.

Механизм полного разрушения барботажного слоя недостаточно освещен в литературе. На тарелках с закрученным потоком для системы воздух-вода такой режим начинается при $W=1,9 \div 2,5$ м/с. По данным [11], для вихревых центробежных ступеней при $W=4 \div 5$ м/с прекращается провал жидкости, при $W=9$ м/с дробление жидкости начинается сразу же в момент ввода ее в контакт с газом. Разрушение барботажного слоя при повышенных скоростях газа, т. е. переход к пневмотранспорту капель жидкости, происходит на тарелках при скоростях, превышающих верхний предел режима. Этот предел выражается зависимостью:

$$W \sqrt{\rho_{\text{ж}}} \geq 2,82 \quad (16)$$

Изучение процесса ректификации на ситчатых тарелках с уменьшенным межтарельчатым расстоянием показало, что начало устойчивой работы тарелки соответствует диаметру

скоростей газа $W = 6,0 \div 8,0$ м/с. Дальнейшее увеличение скорости газа приводило к полному уносу жидкости. Нами установлено, что струя жидкости, вытекающая с края тарелки, разбивалась на капли при $W = 11 \div 14$ м/с.

В опытах, поставленных в колонне с псевдооживленным слоем насадки при $L = 10$ м³/м²ч и $W = 7,0$ м/с, брызгоунос составлял 29,1 %, где L - плотность орошения, W - скорость газа. В работах [12, 13] показано, что при $L = 8$ м³/м²ч и $W = 7$ м/с унос составил 89,5 % от веса подаваемой жидкости. Анализ полученных данных позволил установить [12], что транспортируемый унос зависит от соотношения $\mathcal{E}_k / \mathcal{E}_n$.

Для расчета относительного уноса, выраженного в процентах от подаваемой жидкости, авторами [3] предложены уравнения:

$$U_a = 0,423(\mathcal{E}_k / \mathcal{E}_n)^{2,65}, \text{ при } \mathcal{E}_h / \mathcal{E}_n = 0,72 - 2,32 \quad (17)$$

$$U_a = 19,617(\mathcal{E}_k / \mathcal{E}_n)^{0,448}, \text{ при } \mathcal{E}_h / \mathcal{E}_n = 3,05 - 46,5 \quad (18)$$

Уравнения показывают, что чем меньше запас жидкости, тем более транспортируемый унос.

Для определения транспортируемого уноса в исследовании [4] на основе теоретического анализа выведено уравнение для расчета уноса U_a , выраженного в кг жидкости на кг газа.

Для колонны с диаметром сепаратора от 0,1 до 6 м при $W = 0,02 \div 15$ м/с получено уравнение

$$U_a = 3,8 * 10^{-5} K_b^{0,5}, \quad (19)$$

где
$$K_b = \left(GbW^2 / \sqrt{g^2 G \Delta \gamma} \right) \frac{\sqrt{\gamma_c}}{\sqrt{G/\gamma}}.$$

Для удобства расчетов мы предлагаем уравнение (19) привести к виду:

$$U_a = A(Wd_{kan})^{0,5} + B(Wd_e)^{2,1} \quad (20)$$

Анализируя приведенные данные, можно заметить, что уравнения, где учитывается кинетическая энергия газа \mathcal{E}_k и энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивления жидкости \mathcal{E}_n , являются удобными для расчета транспортного уноса. Для расчета размеров капли удобно также использовать значение $We = 12 \div 13$, широко применяемое рядом авторов. Сопоставление уравнений для определения размеров капель показывает различие в определении влияния таких факторов, как скорость газа, плотность среды, поверхностное натяжение, даже при выводе уравнений, исходящих из одной и той же предпосылки - теории изотропной турбулентности Колмогорова.

Все это показывает необходимость дальнейших экспериментов и расчетов в области систем жидкость в газе [14].

Литература

- 1 Питерский Г.Н. Теория распыления жидкости вращающимися дисками // Теоретические основы химической технологии.- 1981.- №5.- С.746-753.
- 2 Антонов Ю.А., Сафин Р.Ш., Реут В.И. Исследование межфазной поверхности в вихревой распределительной тарелке // Теоретические основы химической технологии.- 1985.- Т.9, №1.- С.140-142.

- 3 Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Кольцова Э.М., Арутюнов С.Ю. Движение полидисперсной двухфазной смеси с учетом дробления включений // Теоретические основы химической технологии.-1983.-Т.17, № 3.-С. 381 –391.
- 4 Гугучкин В.В., Маркович Э.Э., Черкасов В.М., Николаев Н.А. Исследование дробления пленки жидкости, сходящей с кромки пластинки // Труды Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института по переработке газа. -1980.- №6. - С. 185-188.
- 5 Власов Ю.В., Наджока И.И., Наджока Н.Я., Хечтов В.Я. О распределении капель по высоте при капельном уносе // Теоретические основы химической технологии. - 1977.- Т. II, №1.- С. 145-148.
- 6 Ахбердиев А.С., Серимбетов М.А. Гидродинамические режимы работы скоростного пылеулавливающего скруббера с псевдооживленной кольцевой насадкой// Сб. трудов аспирантов и магистрантов ЮКГУ им. М. Ауезова.- №1.- 2000.- С. 37-40.
- 7 Ахбердиев А.С., Серимбетов М.А. О механизме пылеулавливания в прямоточных аппаратах с псевдооживленной кольцевой насадкой// Тр. науч. конф. «История и современность», посвящ. 55-летию Победы в Великой Отечественной войне. Т.3.- Шымкент, 2000.- С.119-120.
- 8 Серимбетов М.А., Ахбердиев А.С. Динамическая высота слоя и брызгоунос в аппаратах с псевдооживленной кольцевой насадкой //Тр. Межд. науч. конф. «Наука и образование- ведущий фактор стратегии Казахстан-2030».- Караганда, 2000.- С.296-298.
- 9 Ахбердиев А.С., Серимбетов М.А., Рахмонов Т., Левш В.И. Исследование сепарации капель из газового потока в прямоточном центробежном сепараторе с осевым завихрителем// Наука и образование Южного Казахстана.- №11(18).- 2000.- С. 226-227.
- 10 Ахбердиев А.С., Серимбетов М.А. Интенсификация пылеулавливания в скруббере с псевдооживленной насадкой // Тр. Респ. экологич. конф. «Человек и природная среда».- Темиртау, 2000.-С. 131-134.
- 11 Серимбетов М.А., Ахбердиев А.С. Особенности гидродинамики псевдооживления насадочных слоев с элементами сложной формы // Наука и образование Южного Казахстана.- №20.- 2000.- С. 128-130.
- 12 Ахбердиев А.С., Серимбетов М.А. Моделирование псевдооживления в насадочном слое с элементами сложной конфигурации // Наука и образование Южного Казахстана.- №23.- 2001.-С. 138-140.
- 13 Ахбердиев А.С., Серимбетов М.А. Гидродинамика и эффективность пылеулавливания в прямоточном скруббере с псевдооживленной кольцевой насадкой // Поиск. - №1.- 2001. - С. 38-44.
- 14 Серимбетов М.А., Ахбердиев А.С. Основные аспекты масштабного перехода при расчете аппаратов с псевдооживленной насадкой // Тр. Межд. науч. конф. «Современные проблемы химической технологии неорганических веществ». Т.1.- Одесса, 2001.- С. 152-154.

Қорытынды

Газ ағымындағы сұйық тамшылары жүйесін модельдеудің белгілі көзқарастарына критикалық талдау келтіріліп, осы талдаудың негізінде химиялық технологияның дисперсті сұйық фазалы аппараттарын есептеуге ұсыныстар жасалған.

Summary

The critical analysis of known approaches to modelling the system of liquid drops in a gas flow has been carried out. On base of this analysis the recommendations to calculating apparatuses of chemical technology with disperse liquid phase have been given.