

ОБЗОР

УДК 536.242

*А. И. Ершов, Л. М. Гухман***К ВОПРОСУ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-
И МАССООБМЕНА
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ**

На 1-й сессии Научного совета по теоретическим основам химической технологии при АН СССР, состоявшейся в 1964 г., было принято решение о необходимости форсирования исследований и разработки методов расчета в области тепло- и массообменных процессов (ректификации, абсорбции, экстракции и др.), проводимых в интенсифицированных режимах.

Тепло- и массообменные процессы, основой которых является взаимодействие газо-жидкостных систем, могут быть интенсифицированы не только за счет оптимальных физико-химических условий, но иногда в значительно большей мере путем создания благоприятных гидродинамических условий. Эти процессы, как правило, характеризуются диффузионной кинетикой, что и обуславливает зависимость их интенсивности от гидродинамического режима. Так, например, исследования массообмена в ректификационных аппаратах пленочного типа [1] показали, что коэффициенты массообмена между жидкой и паровой фазами для целого ряда смесей не зависят от концентрации, но сильно изменяются при изменении скоростей паровой и жидкой фаз.

В настоящей работе преследуется цель осветить на основании систематизированных данных ряда источников состояние исследований, посвященных изучению интенсификации процессов тепло- и массообмена при взаимодействии газо-жидкостных систем в устройствах с высокоскоростными потоками фаз.

Проводились исследования [2—4] процессов пленочной абсорбции и ректификации в устройствах со скоростным прямоточным движением фаз. Было установлено, что степень интенсификации гидродинамического состояния взаимодействующих систем ограничивается следующими факторами: а) возрастанием гидравлического сопротивления контактного элемента, б) снижением к.п.д. контактной ступени за счет уноса жидкой фазы, возникающего при повышенных скоростях газового потока.

Наиболее перспективным методом в интенсификации тепло- и массообмена оказалось применение закрученного потока.

Закрученный поток является искусственной формой движения, образующейся при подводе потока газа или жидкости в контактное устройство через тангенциальные щели или через закручивающие розетки (спиральные, винтовые вставки и т. д.).

Такой поток может быть с постоянным шагом закрутки — в случае установки закручивающего элемента по всей длине аппарата или с переменным шагом — при установке закручивателя или тангенциальных подводов только на некотором начальном участке.

Любой закрученный поток характеризуется профилем тангенциальной компоненты скорости. В зависимости от ее изменения определяется структура потока и степень крутки. В качестве характеристики крутки обычно принимают отношение вращательной скорости к аксиальной.

Величина же крутки зависит в основном от угла подвода потока и от условий ввода.

Первые же работы по применению закрученного потока доказали высокую эффективность этого метода интенсификации процессов тепло- и массообмена.

Исследование конвективного теплообмена в трубе в условиях закрученного потока [5] с переменным по длине шагом, т. е. с установленными на начальном участке закручивателями, показало, что теплообмен возрастает с увеличением угла подвода φ . Этот интенсифицирующий эффект оказывается наиболее ощутимым на начальном участке трубы при $l/d < 40$ (l — удаление от входа).

В рассмотренной области чисел Re на участке трубы $l=20d$ удалось получить в условиях закрученного потока при угле подвода $\varphi=90^\circ$ увеличение критерия Nu по сравнению с незакрученным потоком в 3,8 раза, при росте сопротивления с учетом входных потерь в 6 раз.

Однако более верным является сравнение закрученного и незакрученного потоков по количеству переданного тепла через одну и ту же поверхность нагрева, при одинаковых затратах мощности на преодоление сопротивления движению среды в трубе.

Расчеты показали [5], что с точки зрения энергетического использования системы, сильнозакрученные потоки дают выигрыш в теплообмене на 60—73% по сравнению с незакрученным потоком при одинаковой затрате мощности и одинаковых температурных условиях.

Близкое увеличение коэффициента теплопередачи получено при исследовании трубчатых теплообменников с использованием в качестве закручивателей крученой ленты [6].

Положительное влияние крутки потока на процесс теплообмена было подтверждено и для винтового движения жидкости [7].

Исследования циклонных теплообменников [8] также показали значительную интенсификацию процесса теплообмена в закрученном потоке и позволили создать конструкции достаточно эффективных аппаратов [9, 10].

Ряд авторов [5, 6, 8] в результате проведенных исследований дали эмпирические зависимости для количественной оценки положительного влияния закрутки потока.

Применительно к круглой трубе получено уравнение

$$Nu = Nu_\infty \left(1 + k \frac{d}{l} \right),$$

где Nu_∞ — критерий Нуссельта для незакрученного потока; k — коэффициент, показывающий степень интенсификации теплообмена, определяемый из опыта.

Анализ представленной формулы показывает, что интенсификация процесса наиболее сильно сказывается на начальном участке трубы, т. е. там, где обеспечивается наибольшая крутка потока. Отсюда следует, что при создании эффективных конструкций необходимо стремиться к получению постоянной или незначительно уменьшающейся крутки потока. На основании изложенного можно предположить, что восходящий закрученный поток должен быть более эффективным, чем нисходящий, у которого происходит более быстрое спрямление.

По аналогии с теплообменом следовало ожидать, что закрученный поток позволит интенсифицировать и процессы массообмена.

Действительно, за последние годы был опубликован ряд работ, посвященных данному вопросу, в которых, кроме результатов экспериментов, были опубликованы рекомендации по конструктивному выполнению аппаратов для проведения интенсивного процесса массообмена.

Интенсификация массообмена была исследована на примере испарения предварительно подогретой жидкости внутри цилиндрической трубы с поверхности пленки, закрученной потоком газа [11—13].

Коэффициент массообмена, полученный в результате опытов, автор сравнивает с коэффициентом массообмена, рассчитанным по уравнению

$$Nu_D = 0,019Re^{0,4},$$

которое обычно применяется для расчета массообмена с поверхности пленки воды в незакрученный поток.

На основании опытных данных был сделан вывод, что для исследованного интервала изменения числа Re коэффициент массообмена в среднем в 4 раза больше, чем для обычного незакрученного потока, при возрастании гидравлического сопротивления — в среднем в 7 раз.

Однако сравнение при одинаковых затратах мощности на преодоление сопротивления для перемещения среды показывает, что закрученный поток дает выигрыш в массообмене примерно в 2,5 раза по сравнению с незакрученным потоком.

Сравнительно недавно были исследованы гидродинамика и массообмен на моделях аппаратов с прямоточными контактными устройствами, в которых нисходящему газо-жидкостному потоку придается вращательное движение [13—15].

Исследования показали наличие двух гидродинамических режимов в контактном устройстве: струйчатого и дисперсного. Существование этих режимов зависит от расхода жидкой фазы. Вместе с тем обработка опытных данных в критериальной форме показала, что Eu не зависит от Re , т. е. исследованный интервал работы аппарата находится в автономной области.

Для каждого режима предложено эмпирическое критериальное уравнение вида $Eu = f(Re_{ж}; h/s)$, где s и h — шаг и длина винтовых закручивателей.

Исследования массопередачи на абсорбции NH_3 и CO_2 подтвердили достаточно высокую эффективность закрученного потока. При абсорбции двуокиси углерода водой винтовое движение газо-жидкостного потока позволяет увеличить поверхность контакта фаз и интенсифицировать процесс массообмена в 2—2,5 раза по сравнению с незакрученным потоком.

В случае нисходящего закрученного двухфазного потока при абсорбции CO_2 водой для коэффициентов массопередачи предложены [14, 15] эмпирические зависимости вида

$$K_{аж} = f(Re_{ж}; \omega_r),$$

связывающие коэффициенты массопередачи с плотностью орошения и скоростью газа. Расчеты авторов показывают, что при скорости газа $\omega_r = 23,2$ м/сек коэффициент массопередачи в 25 раз выше максимальных коэффициентов в противоточных трубчатых пленочных колоннах при одинаковых плотностях орошения для случая абсорбции труднорастворимого газа. В опытной модели свободное сечение контактного устройства составляло 19,8% сечения аппарата. При таком соотношении авторы довели скорость в свободном сечении контактных устройств до

35,3 м/сек, что соответствует 7,00 м/сек в расчете на полное сечение аппарата.

На современном этапе исследователи по-разному объясняют причину эффективности закрученного двухфазного потока на тепло- и массообмен. Одни из них [11] основную причину видят в том, что происходит обтекание массоотдающей поверхности плоской тонкой струей газа со значительной скоростью, другие — в том, что использование закрученного потока значительно увеличивает продолжительность контакта фаз [3]. Согласно [1], интенсивность процесса массопередачи повышается с уменьшением длины волны на поверхности пленки.

По аналогии с аэродинамической картиной двухфазного потока в циклонном аппарате [8], где отношение окружной скорости к осевой находится в пределах от 2 до 3, можно утверждать, что собственно скорость движения слоев двухфазного потока на поверхности закрученной пленки в несколько раз больше осевой скорости. При этом из-за касательных усилий на поверхности пленки будет неизбежно происходить повышенное вихре- и волнообразование.

Известна зависимость для длины волны, предложенная П. Л. Капицей [16], которая для рассматриваемого случая может быть применена с некоторым приближением и только для качественной оценки:

$$\lambda = \frac{2\pi}{u_{ж}} \sqrt{\frac{\sigma Y_0}{\rho_{ж}(z-1)(z-a)}},$$

где $\bar{u}_{ж}$ — средняя скорость жидкости; σ — поверхностное натяжение; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости; Y_0 — средняя толщина пленки; z — отношение фазовой скорости волны к средней скорости жидкости. На основании этой зависимости с увеличением скорости двухфазного потока происходит уменьшение длины волны.

Последние положения отчасти подтверждаются исследованиями проточного движения двухфазного незакрученного потока [17]. Эти исследования пленочного течения жидкости в незакрученном потоке показали, что средняя линейная скорость пленки имеет максимальное значение на гребне волны ($v=1,4 v_0$) и минимальное значение во впадине ($v=0,5 v_0$). Следовательно, при определенных значениях длины волны λ происходит локальное изменение направления потока жидкости, т. е. образование вихрей, способствующих интенсивному переносу массы. Очевидно, чем меньше λ , тем больше вихрей возникает на данном отрезке пути пленки.

Таким образом, значительному увеличению коэффициентов тепло- и массопередачи способствует явление волнообразования и вихреобразования на поверхности контакта фаз. Экспериментально доказано, что преобладающее значение имеет первый из указанных факторов [18].

Изучение массопередачи большинством авторов проводилось на одной контактной ступени. Очевидно, при использовании многоступенчатых контактных устройств с закрученным потоком необходимо будет решить задачу отделения жидкой фазы от газа. В противном случае при высоких скоростях газовой фазы по сечению аппарата, которые можно получить благодаря закрученному потоку, возможно снижение к.п.д. контактных ступеней за счет уноса жидкости. Использование центробежной силы крутки самого потока для сепарации брызг окажется наиболее рациональным и экономичным решением вопроса.

До настоящего времени исследования по интенсификации массопередачи проводились в сравнительно слабозакрученном нисходящем потоке, который характеризуется некоторым затуханием крутки и, следовательно,

но, уменьшением эффективности закрученного потока по длине контактных элементов.

В дальнейшем было бы целесообразно провести исследования гидродинамики и массопередачи в восходящем закрученном потоке, который ввиду поджима крутки должен быть более эффективным, чем нисходящий поток.

Выводы

1. Применение закрученного потока позволяет интенсифицировать процесс теплопередачи. Эффективность закрученного потока и гидравлическое сопротивление зависит от величины крутки потока.

2. Применение закрученного потока позволяет интенсифицировать процесс массопередачи. В частности, при абсорбции труднорастворимого газа процесс проходит в 2—2,5 раза более интенсивно, чем в незакрученном потоке.

3. Применение закрученного потока позволяет получить значительные скорости газовой фазы в контактных устройствах и в полном сечении аппарата. Контактные устройства с применением закрученного потока могут способствовать сепарации фаз при значительных скоростях газовой фазы в полном сечении аппарата.

Литература

- 43 1. Б. И. Конобеев, В. А. Малюсов, Н. М. Жаворонков. Хим. пром., № 7, 1961.
2. В. А. Малюсов, Н. А. Малофеев, Н. Г. Кузьмич, Н. М. Жаворонков. Хим. пром., № 6, 1964.
- 38 3. Б. М. Азизов, А. М. Николаев. Вестник техн. и эконом. информ. ГК хим. пром. при Госплане СССР, М., НИИТЭХИМ, № 8, 1964.
4. П. Г. Боярчук, А. Н. Плановский. Хим. пром., № 3, 1962.
- 33 5. Е. К. Ермолин. Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, № 1, 1960.
- 35 6. Trans. Inst. Chem. Engrs. 41, № 4, 1963.
- 34 7. Е. П. Наный. Теплоэнергетика, № 1, 1960.
- 3 8. А. И. Ершов. Канд. дисс. ЛПИ им. Лепсовета, 1962.
- 36 9. А. И. Ершов, И. М. Плехов. Авторская заявка на изобретение № 91601/23, 26, 1964.
10. А. И. Ершов, Н. А. Козулин, В. М. Трофимов. Авторская заявка на изобретение № 1009605/23-26, 1965.
- 37 11. Р. З. Алимов. ЖПХ 35, 3, 1962.
- 38 12. Р. З. Алимов. Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, № 1, 1962.
- 39 13. Р. З. Алимов. Теплоэнергетика, № 3, 1963.
- 40 14. Н. А. Николаев. Тр. Казанского хим.-техн. ин-та им. С. М. Кирова, 32, 1964.
- 41 15. Н. М. Жаворонков, А. М. Николаев. Хим. пром., № 11, 1964.
16. П. Л. Капица. ЖЭТФ, 18, 1, 3, 1948.
17. Portalski S. Industr. and Engng. Chem. Fundament, N 1, 3, 1964, 49—53.
18. Portalski S. PhD thesis, London University, 1960.

[26. XI 1965 г.]

Технологический институт им. С. М. Кирова,
г. Минск