

УДК 536.248.2

Э. Г. БРАТУГА, докт. техн. наук, Р. Г. АКМЕН, канд. техн. наук

О. В. КРУГЛЯКОВА, канд. техн. наук, В. В. ЧУБАРОВА

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-МОДУЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА КОНТАКТНЫХ АППАРАТОВ ФОРСУНОЧНОГО ТИПА

Предложена новая идея пропорционально-модульного метода расчета контактного тепло-массообменного аппарата форсуночного типа, в соответствии с которой интегральный эффект передачи теплоты и массы между взаимодействующими средами, обусловленный совокупным действием множества распылителей с заданной топологией, может быть установлен путем расчета единственного центрального (базового) распылителя.

Запропонована нова ідея пропорційно-модульного методу розрахунку контактного тепло-масообмінного апарата форсуночного типу, у відповідності з якою інтегральний ефект передачі теплоти та маси між взаємодіючими середовищами, що обумовлена сукупною дією множини розпилювачів із заданою топологією, може бути встановлений шляхом розрахунку одного центрального (базового) розпилювача.

Введение

Развитие теории контактного тепло- и массообмена в газокапельных средах существенно сдерживается отсутствием надежных теоретических основ и методов, в которых путем аналитических подходов учитывается многофакторность процесса взаимодействия фаз или компонентов при минимальном использовании эмпирических соотношений, ограниченных условиями проведения эксперимента, при которых они были получены.

Анализ путей развития аппаратов контактного типа и опыт их создания в энергетике, химической технологии и других областях показывает, что основными направлениями совершенствования таких устройств являются интенсификация процессов, создание оборудования с оптимальными режимно-конструктивными характеристиками, разработка новых типов оборудования.

Указанные характеристики, под которыми обычно понимают зависимости, устанавливающие связи между начальными и конечными состояниями взаимодействующих сред при различных режимах работы аппарата представляют в настоящее время, как правило, результат экспериментальных исследований. При этом предварительно выбранный диапазон изменения основных параметров (теплотехнических, гидродинамических) покрывается равномерной сеткой, узлы которой определяют условия проведения эксперимента. Данные эксперимента аппроксимируются в виде критериальных зависимостей, которые и используются затем для практических инженерных расчетов.

Очевидно, что реализация такого подхода правомерна лишь в том диапазоне режимно-геометрических характеристик, в рамках которых проводились экспериментальные исследования. Это ограничивает как возможность поиска оптимальных решений, так и возможность использования метода расчета для создания новых аппаратов. Эти обстоятельства приводят к серьезным затруднениям при решении ряда важных практических задач, и в первую очередь задачи оптимизации. Кроме того, проведение экспериментальных исследований связано, обычно с большими затратами времени и материальных средств.

Выбор и обоснование направления исследований

Существующие способы расчета в связи с целым рядом допущений и упрощений реальной физической картины взаимодействия фаз в аппарате контактного типа не отвечают требованиям адекватности математической модели. В силу этого они не могут служить достаточно надежной базой для проектирования целого ряда тепло - массообменных аппаратов

различного технологического назначения.

К числу наиболее распространенных допущений, которые с нашей точки зрения приводят к рассогласованию теоретических и экспериментальных результатов, относятся следующие.

Во-первых, это замена полидисперсного ансамбля капель диспергированной жидкости некоторыми средними (модальными или медианными) размерами капель. При превалирующем эффекте испарения влаги с поверхности капель это допущение может в существенной мере повлиять на конечные параметры взаимодействующих сред вплоть до погрешностей, несовместимых даже с требованиями, предъявляемыми к расчетам предварительного характера.

Во-вторых, это допущение о равномерном распределении локальных расходов диспергируемой жидкости во входном поперечном сечении аппарата. Вместе с тем, как известно [1, 2], все контактные аппараты форсуночного типа представляют собой систему фактически точечных источников диспергируемой среды, размещённых с определённой плотностью на единице поверхности. В различных случаях эта плотность может составить от 6 до 30 форсунок, приходящихся на один метр квадратный поперечного сечения аппарата.

В-третьих, допущение о равномерном распределении локальных расходов диспергируемой жидкости по окружности факела, а соответственно и вдоль его оси.

В связи с этим представляются очевидными актуальность и научная новизна создания на основе математического моделирования методики расчета процессов тепло- и массообмена в контактных аппаратах с распределёнными источниками диспергируемой среды свободной от перечисленных выше допущений.

На сегодня известны работы Г. Л. Бабухи и А. А. Шрайбера [2], З. Р. Горбиса [3], Д. Г. Пажи и В. Галустова [1, 4] и других авторов, в которых разработаны соответствующие методы расчета процессов тепло- и массообмена в газожидкостных потоках с полидисперсным характером дискретной фазы.

Но всем существующим методам в той или иной мере присущи перечисленные выше допущения. Центральным, с нашей точки зрения, является допущение о равномерности распределения основных характеристик взаимодействующих фаз по поперечному сечению канала, в котором реализуются обменные процессы.

В случае, когда фактор неравномерности вводится в общую систему уравнений, возникает необходимость учета особенностей работы топологически различных локальных групп распылителей. Именно это создает трудности не только при создании аппарата, но и при разработке методики их расчета.

Основная часть

Основная идея, заложенная в основу метода, предлагаемого в настоящей работе, заключается в следующем.

В контактном аппарате любого типа всегда имеет место соответствующая симметрия топологии источников дисперсной среды относительно некой плоскости вдоль рабочего пространства взаимодействия фаз или компонентов. При этом все локальные источники можно разделить на три основных группы. К первой принадлежат те, в факелах которых обменные процессы с достаточной точностью не зависят от влияния поверхностей, ограничивающих рабочее пространство аппарата. Ко второй группе относятся те источники дисперсной среды, у которых от 30 до 80 % капель приходят во взаимодействие с указанными ограждающими поверхностями. Третья группа – это источники, занимающие промежуточное положение по своей топологии между первой и второй группами.

В связи с этим, количество переданной теплоты или массы в межфазном теплообмене для распылителя, размещенного в одной из трех групп, заменяется в соответствии с некой пропорциональной закономерностью относительно обменного эффекта, который создается центральным (базовым) распылителем. Это позволяет установить на основе соответствующим образом организованных численных экспериментов ряд обобщающих закономерностей модульно-пропорциональных соотношений эффекта обменного процесса некоего i -го факела

распылителя относительно эффекта, создаваемого центральным (базовым) распылителем. Такой подход дает возможность учитывать фактически любую топологию источников дисперсной фазы в рабочем пространстве аппарата с произвольной конфигурацией.

Для реализации предлагаемой методики расчета кроме системы уравнений, образующих математическую модель процесса тепло- и массообмена в контактном аппарате форсуночного типа [5] используются ряд обобщений экспериментальных данных.

На основе экспериментальных исследований с использованием счетно-импульсного метода измерения размеров капель [6] для типовых распылителей У-1 камер орошения центральных кондиционеров было получено аппроксимационное соотношение для определения изменения дисперсного состава капель вдоль оси факела.

Так как в математической модели, как уже отмечалось, использовалась однопараметрическая функция распределения [7] с параметром распределения α , однозначно определяющим весь спектр размеров, то оказалось целесообразным обобщение результатов представить в виде функции относительной величины:

$$\beta = \frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{4,49678}{0,6 + 3,953641 \cdot e^{-2,9386 \cdot 10^{-6} \cdot y^{2,5}}}, \quad (1)$$

где α – текущее значение параметра функции распределения капель по размерам вдоль оси факела;

α_0 – та же величина на начальном участке факела:

$$\alpha_0 = \frac{3,05}{0,6 + 3,953641 \cdot e^{-2,9386 \cdot 10^{-6} \cdot 30^{2,5}}} = 0,6782. \quad (2)$$

Для учета неравномерности распределения значений модального размера капель D_m и локального расхода g по окружности факела использовались результаты [6], обобщенные в виде соотношений:

$$D_m = D_{\min} + \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2} \left(1 + \sin \left(2\pi \cdot \left(\frac{360 - \gamma}{360} \right)^m \right) \right), \quad (3)$$

$$g = g_{\min} + \frac{g_{\max} - g_{\min}}{2} \left(1 + \sin \left(2\pi \cdot \left(\frac{360 - \gamma}{360} \right)^m \right) \right), \quad (4)$$

где D_{\min} и D_{\max} – минимальный и максимальный модальный размер капель в общей зависимости (3);

g_{\min} и g_{\max} – минимальный и максимальный локальный расход;

γ – угол по окружности факела;

m – параметр кривой, $m = 0,75$.

Для аналитического отображения изменения величин α по окружности факела в соответствии с [7]:

$$\alpha = \frac{3,05}{D_m}. \quad (5)$$

Следует отметить, что максимальная относительная погрешность аппроксимирующих зависимостей (1)–(4) не превышает 1 %.

Практика расчета теплообменных аппаратов всегда базируется на некоторых их режимно-геометрических характеристиках, диапазон изменения которых определяется двумя основными факторами и, как правило, входит в число исходных данных.

К числу этих факторов относятся следующие.

1. Возможность унификации аппаратов и построения на этой основе соответствующего параметрического ряда, обеспечивающего минимум капитальных затрат при их производстве. При этом, как правило, на основе многолетней практики эксплуатации и проведения исследований для контактных аппаратов форсуночного типа должны быть реализованы следующие рекомендации:

- типоразмеры распыливающего устройства;
- плотность размещения ξ этих устройств в поперечном сечении аппарата;
- массовая скорость газовой среды в рабочем пространстве аппарата, определяющая допустимые гидравлические сопротивления аппарата и возможность надежной работы каплеотделителей на выходе из аппарата;
- диапазон перепада давления жидкости на форсунке, обеспечивающий качественный распыл при минимальных энергозатратах на диспергирование.

Исходя из этого, для возможности последующего установления адекватности общей математической модели и достоверности предлагаемого пропорционально-модульного метода расчета аппаратов контактного типа были приняты следующие исходные режимно-геометрические характеристики.

- плотность размещения распылителей $\xi_1=18$ шт/м², $\xi_2=24$ шт/м²;
- массовая скорость воздуха применительно к политропному процессу охлаждения и осушки газа $\rho v=3,0-3,2$ кг/(м²с);
- перепад давления жидкости на форсунках $\Delta P=1,0-2,5$ бар.
- дисперсные и расходные характеристики распылителя назначались по результатам экспериментальных исследований [8] центробежной однозаходной форсунки У-1, получившей широкое применение в контактных аппаратах различного теплотехнологического назначения.

В соответствии с этим алгоритм реализации пропорционально-модульного метода расчета контактного аппарата форсуночного типа может быть представлен следующим образом.

1. По известным значениям энтальпии i_1 и влагосодержания газа d_1 на входе в аппарат и требуемому состоянию i_2 и d_2 на выходе из аппарата, а также расходу газа L определяются тепловой поток Q и количество конденсируемой влаги при политропной обработке воздуха

$$Q = L(i_1 - i_2), \quad (6)$$

$$W_e = L(d_1 - d_2). \quad (7)$$

2. По задаваемой массовой скорости w_p находится требуемое сечение камеры F

$$F = \frac{L}{\rho v}. \quad (8)$$

3. Далее расчет можно продолжить в двух вариантах.

По первому варианту высота сечения h и его ширина b принимаются из конструктивных соображений, обусловленных особенностями компоновки аппарата.

По второму варианту (если это касается камер орошения центральных кондиционеров)

полученное значение F сопоставляется с принятым стандартным параметрическим рядом имеющихся камеры орошения и выбирается наиболее близкий типоразмер аппарата.

4. Задавая рекомендуемую плотность размещения форсунок ξ (либо 18, либо 24 шт/м²) находят требуемое число форсунок прямого и противоточного рядов

$$N = \xi F \quad (9)$$

5. Форсунки размещаются в сечении F в соответствии с принимаемой топологической сеткой, в центре ячеек которой располагаются форсунки. Формирование указанной сетки выполняется так, чтобы центральный (базовый распылитель) размещался в пересечении диагоналей поперечного сечения аппарата. При этом фиксируются координаты y и z каждого i -го распылителя (рис. 1).

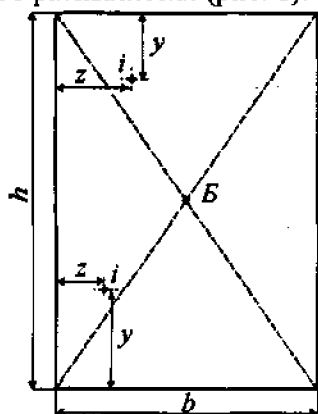


Рис. 1. Схема поперечного сечения аппарата

6. Принимается температура воды $t_{ж1}$ на выходе из распылителя.

7. По значению $t_{ж1}$ и предварительно полученным зависимостям теплового потока и потоков массы при конденсации и испарении в функции этой температуры для центрального распылителя определяется удельный теплосъем центрального распылителя q_0 и количество конденсирующейся q_k и испарившейся q_n влаги.

8. Для выполнения дальнейших расчетов используются обобщенные зависимости, полученные на основе численной реализации математической модели процесса тепло- и массообмена между взаимодействующими средами. В этих зависимостях тепловой поток q_0 , потоки массы q_{ki} и q_{ni} получены в функции соответствующих значений q_0 , q_k , и q_n для базового распылителя. Эти зависимости имеют вид:

$$q_i = q_0 [0,19 \ln(\bar{y}) + 1,018] [0,185 \ln(\bar{z}) + 1,0185], \quad (10)$$

$$g_{ki} = g_k [\bar{y} / (0,793\bar{y} + 0,176)] [\bar{z} / (0,79\bar{z} + 0,18)], \quad (11)$$

$$g_{ni} = g_n [\bar{y} / (0,793\bar{y} + 0,176)] [\bar{z} / (0,79\bar{z} + 0,18)]. \quad (12)$$

9. С помощью соотношений (10)-(12) рассчитывается теплосъем, количество конденсирующейся и испарившейся влаги для каждой i -той форсунки, исходя из ее относительных координат в рабочем пространстве аппарата $\bar{y} = 2y/h$ и $\bar{z} = 2z/b$, где y – расстояние форсунки от пола камеры, если она расположена ниже центра камеры, и расстояние от потолка камеры, если форсунка расположена выше центра камеры; z – расстояние форсунки от боковой стенки (см. рис. 1).

10. Суммарный средний теплосъем и влагосъем определяются как

$$\bar{q} = \left[q_0 + \sum_{j=1}^n q_j \right] / (n+1), \quad (13)$$

$$\bar{g} = \left[g_0 - g_e + \sum_{i=1}^n g_{ei} - \sum_{i=1}^n g_{ni} \right] / (n+1), \quad (14)$$

где n – число форсунок, включая центральную форсунку.

11. Определяется требуемый расход воды на камеру как

$$G_a = Q/\bar{q}. \quad (15)$$

12. Вычисляется коэффициент орошения

$$\mu = G_a / L. \quad (16)$$

13. Определяется производительность одиночного распылителя

$$W_i = G_a / N. \quad (17)$$

14. Задаваясь типоразмером форсунки, по результатам эксперимента находят то значение перепада давления жидкости $\Delta P_{\text{ж}}$ на форсунке, которое обеспечивает значение W_i из (17).

15. По найденной величине $\Delta P_{\text{ж}}$ для выбранного типоразмера форсунки определяют параметр функции распределения капель по размерам α , что позволяет проводить расчеты траектории и интенсивности тепло-массообмена по соответствующим уравнениям математической модели [5].

16. Если величина $\Delta P_{\text{ж}}$ не выходит за пределы 1,0–2,5 бар, то в соответствии с известными рекомендациями [10], расчет можно считать законченным.

Для проверки достоверности результатов, полученных на основе представленной выше методики, были использованы данные экспериментальных исследований [9] двухрядной камеры орошения с форсунками У-1 в политропных процессах с понижением энтальпии воздуха. В этих экспериментах была установлена зависимость коэффициента эффективности камеры E_i в функции коэффициента орошения.

При этом E_i вычислялось по формуле

$$E_i = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{w2}}, \quad (18)$$

где i_1 и i_2 – начальная и конечная энтальпии обрабатываемого воздуха;

i_{w2} – энтальпия насыщенного воздуха при температуре, численно равной конечной температуре распыливаемой воды.

На рис. 2 показаны результаты сравнения.

Из сопоставления результатов, показанных на рис. 2 видно, что максимальное отклонение данных расчета от экспериментальных значений коэффициент эффективности не превосходит 10%. С учетом использования значительного числа данных, касающихся дисперсного состава капель, производительности форсунки и, особенно, критериальных зависимостей, определяющих условия тепло- и массопереноса, этот результат можно считать вполне удовлетворительным.

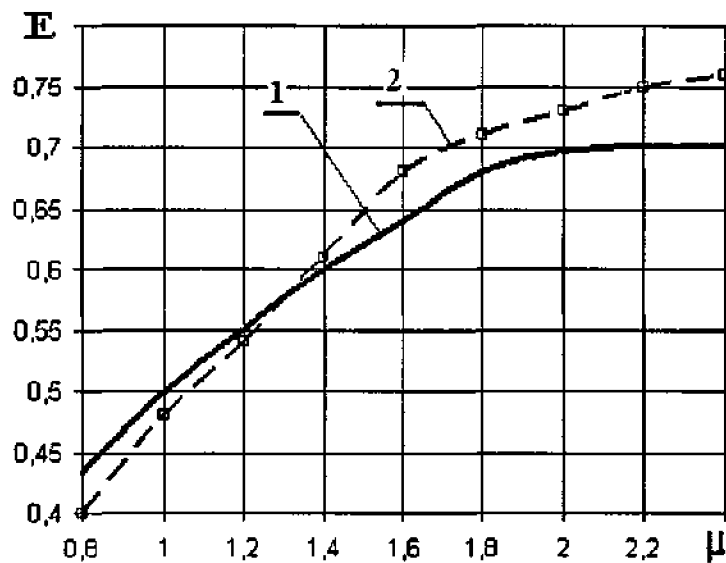


Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов:
1 – эксперимент; 2 – расчет

Выводы

Разработан пропорционально-модульный метод расчета контактных аппаратов форсуночного типа, позволяющий учитывать произвольную топологию источников дисперсной фазы в рабочем пространстве аппарата с произвольной конфигурацией. Предложена новая методика расчета тепломассообменных аппаратов контактного типа, которая описывает процессы тепломассообмена как при конденсации паровой фазы на поверхности капель, так и при испарении последних и разрешает без проведения дорогостоящего физического эксперимента определять все необходимые характеристики контактных аппаратов разнообразного теплотехнологического назначения.

Список литературы

1. Галустов В. С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
2. Бабуха Г. А., Шрайбер А. А. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках. – К.: Наукова думка, 1972. – 175 с.
3. Горбис З. С. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. – М.: Энергия, 1970. 424 с.
4. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
5. Братута Э. Г., Акмен Р. Г., Чубарова В. В. Зависимость эффективности контактного аппарата форсуночного типа от топологии распылителей // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2007. - №7. – С. 75–81.
6. Братута Э. Г., Переселков А. Р. Расчет функции распределения капель по размерам при использовании счетно-импульсного метода // Инженерно-физический журнал. Т. 27. № 5. 1974.
7. Братута Э. Г. Диагностика капельных потоков при внешних воздействиях. – Харьков: Вища школа, 1987. – 144 с.
8. Бородин В. А., Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А. Распыливание жидкостей. – М.: Машиностроение, 1967. – 265 с.
9. Кокорин О. Я. Установки кондиционирования воздуха. Основы расчета и проектирования.

– М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.

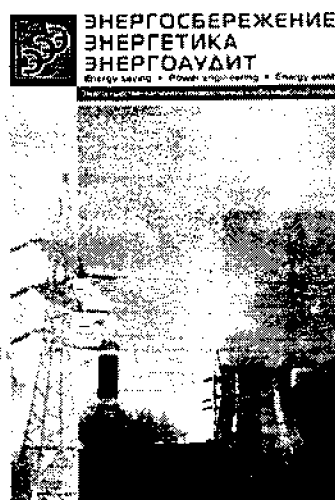
10. Белова Е. М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях. – М.: Евроклимат, 2006. – 640 с.

PROPORTIONAL-MODULAR METHOD FOR CALCULATION OF SPRAY HEAT AND MASS EXCHANGER WITH NOZZLES

E. G. BRATUTA, D-r. Tech. Sci., R. G. AKMEN, Cand. Tech. Sci.,
O. V. KRUGLIAKOVA, Cand. Tech. Sci., V. V. CHUBAROVA, NTU "KhPI"

A new proportional-modular method of calculation of spray heat and mass exchanger with nozzles has been proposed. According to it, the integrated effect of heat and mass transfer between interacting environments which is caused by cumulative action of set of sprays with the given topology, can be found by calculation of a unique central (base) spray.

Поступила в редакцию 25.04.09



Уважаемые читатели!

На страницах журнала
«ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ • ЭНЕРГЕТИКА • ЭНЕРГОАУДИТ»
продолжается заочное заседание
«круглого стола» на тему:
**«Государственная политика энергосбережения
в Украине:**

организация, управление, стимулирование».

К обсуждению данной темы приглашаем
руководителей государственных администраций
и энергопередающих компаний,
промышленных предприятий, ученых и
всех заинтересованных.

Вашу позицию по указанной проблеме
Предлагаем изложить письменно и направить в наш адрес:
61002, г. Харьков, ул. Мироносицкая, 60,
Тел./факс (057) 7-149-451, E-mail: svenco_ltd@rambler.ru