УДК 62-13:621.647.23

А.Ф. Сорокопуд, Д.С. Стрижков, В.С. Козымаев

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ НОВОГО КОНТАКТНОГО ЭЛЕМЕНТА РОТОРНОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Исследовано влияние скорости газа на приведенный коэффициент массоотдачи в газовой фазе, относительный брызгоунос и гидравлическое сопротивление нового контактного элемента роторного распылительного аппарата. Испытаны пристенные каплеотбойники с различными геометрическими параметрами: ширина, шаг установки, угол подъема пластин. Обоснованы допустимая скорость газа в аппарате и конструкция пристенного каплеотбойника. Выполнен сравнительный анализ с результатами подобных исследований.

Массообмен, увлажнение, брызгоунос, гидравлические сопротивления, нагрузка по газу.

Введение

Роторные распылительные аппараты (РРА) с многократной циркуляцией и диспергированием жидкости на каждом контактном элементе (КЭ) являются перспективным видом оборудования для аппаратурного оформления таких процессов, как ректификация и упаривание термолабильных смесей под вакуумом, мокрая пылеочистка и абсорбция газов с низкой потенциальной энергией [1–4].

Основные характеристики РРА (эффективность осуществляемых процессов, энергозатраты, производительность по паровой (газовой) и жидкой фазам и др.) существенным образом зависят от конструктивных особенностей КЭ. Системный анализ РРА, выполненный в [5], подтверждает роль конструктивных элементов. В частности, отмечено, что совершенствование конструкции пристенного каплеотбойника на КЭ позволяет существенно повысить предельную нагрузку по газу и создать дополнительную, интенсивно обновляющуюся поверхность контакта фаз, снизить энергозатраты и повысить производительность.

Результаты исследования брызгоуноса на КЭ РРА наиболее подробно изложены в [6], где также отмечается роль пристенных каплеотбойников (ПК) с точки зрения допустимой скорости газа в аппарате. Пристенный каплеотбойник позволяет снизить количество вторичных капель, подверженных уносу, создать дополнительную поверхность контакта фаз.

С целью повышения эффективности РРА и улучшения технико-экономических характеристик разработан новый КЭ [7], отличающийся конструкцией ПК, однако данная конструкция не исследована, что затрудняет ее использование.

Цель работы – определение основных характеристик нового КЭ РРА: коэффициента массоотдачи в газовой фазе, относительного брызгоуноса и гидравлических сопротивлений.

Объекты и методы исследований

Экспериментальные исследования выполнены на КЭ, представленном на рис. 1 [7]. Работа контактного элемента осуществляется следующим образом. Рабочая жидкость из питающей чаши сливной тарелки 5 заборным устройством распылителя 3 подается в диспергирующее устройство (перфорированный цилиндр) и под действием центробежной силы выбрасывается в свободное пространство КЭ в виде струй и капель. Размер капель и скорость их полета определяются свойствами рабочей жидкости, диаметром отверстий на поверхности диспергирующего устройства распылителя и угловой скоростью его вращения.

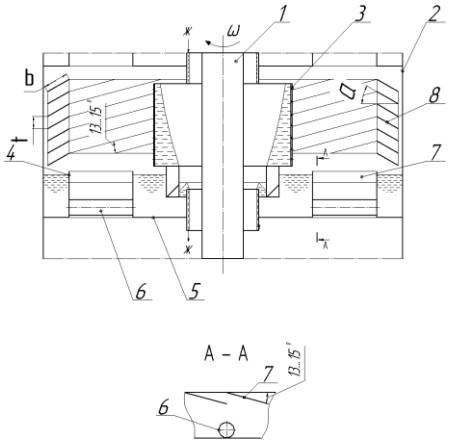

Рис. 1. Схема исследуемой конструкции КЭ: 1 – вал; 2 – корпус; 3 – диспергирующее устройство; 4 – газоходы; 5 – сливная тарелка; 6 – переточные трубы; 7 – направляющие лопатки; 8 – пристенный каплеотбойник

Достигнув пристенного каплеотбойника 8, капли ударяются о его пластины, скользят по ним, по корпусу 2 и далее стекают на сливную тарелку 5. Касательный удар капель о поверхность пластин уменьшает вероятность образования вторичных капель и снижает брызгоунос. При касательном ударе большая часть энергии ударяющихся капель расходуется не на дробление жидкой пленки, а на ее перемешивание. В результате образуется высокоразвитая и интенсивно обновляющаяся поверхность межфазового контакта.

Из периферийной части тарелки 5 рабочая жидкость по переточным трубам 6 поступает в ее питающую чашу, откуда заборным устройством распылителя 3 вновь подается в диспергирующее устройство.

Избыток жидкости в объеме, равном количеству свежепоступившей, сливается на нижележащий КЭ по переливной трубе, расположенной в центре сливной тарелки 5 соосно валу 1.

Поднимающийся по аппарату газ (пар) на каждом КЭ движется вслед за факелом распыленной жидкости в условиях, близких к прямотоку, что обеспечи-

вается соответствующим углом установки как направляющих лопаток 7 внутри газоходов, так и пластинок пристенного каплеотбойника 8. В результате газ (пар) сохраняет вращательное движение и проходит с меньшим сопротивлением в каналах, образованных наклонно установленными под углом 13...15^0 пластинками пристенного каплеотбойника 8. Двигаясь вслед за факелом распыленной жидкости, газ (пар) поступает в зону пониженного давления, создаваемую летящими каплями. При организованных таким образом условиях движения газа (пара) снижаются затраты энергии на преодоление гидравлических сопротивлений КЭ.

Вращательное движение потока газа (пара) увеличивает эффект сепарации капель в пространстве между пластинками каплеотбойника, что снижает брызгоунос. Одинаковый угол наклона направляющих лопаток 7 и пластинок каплеотбойника 8 по направлению движения газа (пара) не только снижает гидравлическое сопротивление, но и обеспечивает дополнительную турбулизацию и обновление поверхности межфазового контакта образованной пленкой жидкости на нижней стороне пластинок каплеотбойника. Благодаря этому повышается эффективность проводимых процессов и снижается брызгоунос на КЭ.

Закрученное движение газа (пара) сохраняется по всей высоте за счет тангенциального ввода и вывода газа (пара) из аппарата, за счет направляющих лопаток 7, установленных под углом 13...15^0 к плоскости тарелки 5, в ее газоходах 4, за счет пластин каплеотбойника 8, установленных у корпуса 2 с углом подъема 13...15^0 по направлению движения газа (пара).

Все эксперименты на КЭ выполнены на системе воздух – вода при температуре (20±1) ^{o}С. Использовалась питьевая вода из водопроводной сети. Расход воды измерялся ротаметрами РС-5 с набором сменных поплавков. Производительность распылителя определялась по общепринятой методике – путем отбора 1/92 части факела распыленной жидкости. Это основано на многократно проверенном многими исследователями факте, что факел распыленной перфорированным цилиндром жидкости обладает круговой симметрией по плотности потока.

Исследования выполнены на КЭ диаметром 0,25 м, использовался распылитель диаметром 0,075 м с 10 рядами отверстий диаметром 1,5*10^{-3} м, расположенных в шахматном порядке с окружным шагом $t_{окр}$ = 5*10^{-3} м и осевым шагом $t_{ос}$ = 4,5*10^{-3} м, всего 460 отверстий.

На КЭ помещались различные конструкции ПК, характеристики которых приведены в таблице, а обозначения – на рис. 1.

Характеристики ПК

ПК	b, мм	t, мм	α, град	$F_П$, x10^{-3}, м^2
ПК-1	20	10	30	54,6
ПК-2	25	10	35	71,5
ПК-3	30	10	30	79,2
ПК-4	30	20	30	66,5
ПК-5	25	10	15	60
ПК-6	25	10	30	70,5
ПК-7	20	10	20	62,4

Примечание. $F_п$ – суммарная площадь пластин ПК.

Частота вращения распылителя ω подбиралась исходя из условия получения объемно-поверхностного диаметра d_{32} = 1,1 мм, поскольку в каплях диаметром менее 1 мм затухают конвективные токи, скорость капель $U_2 = \omega \cdot r$ (где r – наружный радиус перфорированного цилиндра, м), находилась из выражения [8]:

$$d_{32} = d_0^{0,58} * \rho^{0,28} * \sigma^{0,34} / (84 * U_2^{0,85} * \mu^{0,34}),$$

где d_0 – диаметр отверстия истечения, м; ρ – плотность распыляемой жидкости, кг/м^3; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па*с.

Необходимая частота вращения распылителя составила 1500 об/мин.

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе определялся по известной методике (Ю.Н. Скрынник, О.С. Чехов, 1990) при адиабатическом испарении воды в поток воздуха. Для обеспечения минимальной погрешности получаемых данных воздух в установку подавался с относительной влажностью не более 35 %. Параметры воздуха на входе и выходе из установки определялись с помощью цифрового термогигрометра «Термит» с погрешностью ±2,5 %. Ошибка в определении коэффициента массоотдачи по данной методике не превышает 10…15 %.

Брызгоунос определялся сепарационным методом – путем улавливания на вышерасположенной тарелке уносимых потоком воздуха капель с исследуемого КЭ. Для этого над тарелкой устанавливался жалюзийный сепаратор, а газоходы были сверху ограждены отбойниками. Измерения выполнялись не менее чем в 3 повторениях, расхождение не превышает 12…15 %. При анализе полученных данных брызгоунос e представлялся относительной величиной: кг унесенной жидкости на кг прошедшего за одно и то же время газа через КЭ.

Гидравлическое сопротивление исследуемого КЭ – сухого и орошаемого – измерялось с использованием микроманометра ММН-240. Выполнялось не менее 5 замеров, ошибка в измерении не превышала 10…12 %.

Исследования выполнены в диапазоне скоростей газа на КЭ – $U_в$ = 2,9…4,2 м/с.

Результаты и их обсуждение

В РРА подобной конструкции массоотдача осуществляется главным образом при полете капель в

свободном пространстве КЭ (β_1) и при ударе их о поверхность пленки жидкости на пластинах ПК и стенке КЭ (β_2) (А.А. Авруцкий, Г.П. Соломаха, 1979). При использовании одного и того же распылителя на КЭ условия полета капель в свободном пространстве будут одинаковы, а следовательно, будут равны значения β_1 и поверхность контакта фаз, образованная при этом. Повышения значения суммарного коэффициента массоотдачи (β_{GF}) будут связаны с ростом β_2.

Ввиду отсутствия сведений о поверхности контакта фаз в зоне удара на исследуемом КЭ рассматривалось суммарное значение β_{GF} (суммарный коэффициент массоотдачи в газовой фазе, отнесенный к площади поперечного сечения аппарата).

Анализ полученных данных показывает, что суммарный коэффициент массоотдачи β_{GF} возрастает с увеличением скорости газа. Значения β_{GF} для ПК-1…ПК-4, ПК-7 во всем диапазоне скоростей газа отличаются незначительно. Как следует из рис. 2, ПК-5 и ПК-6 обеспечивают существенно большее значение β_{GF}. На наш взгляд, это можно объяснить конструктивными параметрами ПК (см. таблицу). При одинаковых b = 25 мм, t = 20 мм для ПК-5 и ПК-6 они отличаются углом ά и величиной $F_п$. Для ПК-5 ά = 15^0, для ПК-6 ά = 30^0. Значения суммарного коэффициента массоотдачи несколько выше для ПК-5, хотя $F_п$ ниже, чем у ПК-6. Можно утверждать, что условия массоотдачи на ПК-5 более благоприятные, чем на ПК-6 и тем более на остальных исследованных вариантах.

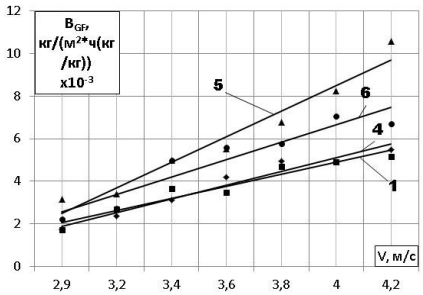

Рис. 2. Зависимость приведенного коэффициента массоотдачи от скорости газа: 1 – ПК-1; 4 – ПК-4; 5 – ПК-5; 6 – ПК-6

Сравнение полученных результатов с данными работы [9], которые были получены на ПК с вертикально установленными пластинами, показывает следующее. Максимальная скорость воздуха в [9] составляла 2,8 м/с, при этом в условиях увлажнения при рациональных параметрах β_{GF} = 8,8 кг/(м^2*ч(кг/кг))*10^{-3}. Дальнейшее увеличение скорости газа лимитировалось интенсивным брызгоуносом. В настоящей работе при $U_в$ = 4,2 м/с для ПК-5 β_{GF} = 9, а для ПК-6 – β_{GF} = 7 кг/(м^2*ч(кг/кг))*10^{-3}.

Анализ данных, представленных на рис. 3, показывает высокое значение относительного брызгоуноса для ПК-5 и наименьшее для ПК-6 – при $U_в$ = 4,2 м/с e = 0,032 кг/кг.

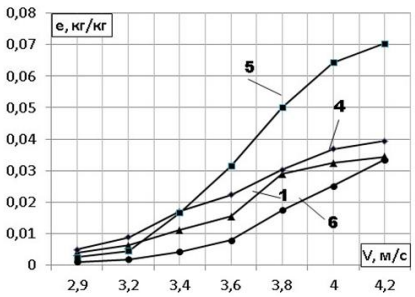

Рис. 3. Зависимость относительного брызгоуноса от скорости газа: 1 – ПК-1; 4 – ПК-4; 5 – ПК-5; 6 – ПК-6

В работе [8] исследован брызгоунос на КЭ с ПК, выполненными в виде вертикальных пластин различной геометрии, наименьший относительный брызгоунос для наиболее рациональных конструкций ПК при одинаковых скоростях жидкости составлял e = 0,048…0,05 кг/кг при $U_в$ = 3,8 м/с.

Высокие значения брызгоуноса для ПК-5 обусловлены геометрическими параметрами (см. таблицу) и в первую очередь малым углом наклона пластин ά. В этом случае образуется большее количество мелких капель, подверженных уносу в зоне удара о пластинки ПК-5.

Результаты, полученные на ПК-5, не превышают общеизвестную допустимую величину брызгоуноса, равную 0,1 кг/кг. Более того, на ПК-6 получены меньшие значения брызгоуноса при больших скоростях газа, что свидетельствует о перспективности исследуемой конструкции.

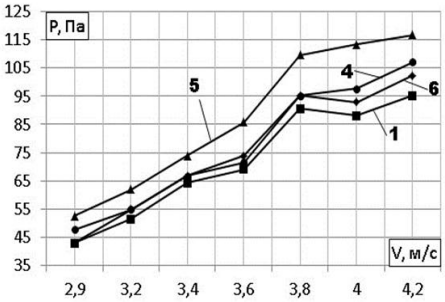

Рис. 4. Зависимость гидравлических сопротивлений от скорости газа на сухом КЭ: 1 – ПК-1; 4 – ПК-4; 5 – ПК-5; 6 – ПК-6

Представленные на рис. 4 данные свидетельствуют об одинаковом характере зависимости потерь напора на неорошаемом (сухом) КЭ для всех испытанных ПК. Причем ПК-5 обладает большим сопротивлением. ПК-1, ПК-4 и ПК-6 имеют близкие потери напора, но при $U_в$ = 3,8…4,2 м/с наименьшие потери напора у ПК-1.

Из анализа рис. 4 и 5 следует, что потери напора на орошаемом КЭ ниже, чем на сухом, для всех ПК. Это можно объяснить наличием вентиляционного эффекта, создаваемого факелом распыляемой жидкости. Капли факела, диспергированные вращающимся диспергирующим устройством, обладая определенным запасом энергии, эжектируют близлежащие слои воздуха. Газ, подаваемый на КЭ, попадает

в зону разрежения, создаваемую летящими каплями, и движется в условиях, близких к прямотоку.

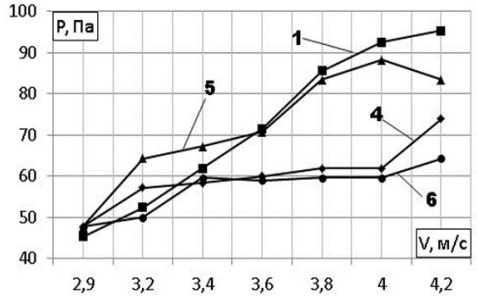

Рис. 5. Зависимость гидравлических сопротивлений от скорости газа на орошаемом КЭ: 1 – ПК-1; 4 – ПК-4; 5 – ПК-5; 6 – ПК-6

Из рис. 5 следует, что потери напора на КЭ с ПК-4 и ПК-6 наименьшие, причем при $U_в \geq 3{,}4$ м/с они существенно ниже, чем при ПК-1 и ПК-5. Это свидетельствует, на наш взгляд, о том, что геометрические параметры ПК-4 и ПК-6 более благоприятные для прохождения воздуха в условиях орошения КЭ.

Гидравлическое сопротивление КЭ РРА с использованием ПК с вертикальными прямыми пластинками исследовано в [11], где показано, что при близких к реализованным в данной работе условиях потери напора на орошаемом КЭ при $U_в = 3{,}5…4{,}0$ м/с составляют 220…250 Па.

Проведенные исследования показывают, что КЭ [7] с ПК-6 (b = 25 мм, t = 10 мм, $\acute{\alpha} = 30^0$) обеспечивают более благоприятные аэродинамические условия для прохода газа. В результате снижается гидравлическое сопротивление орошаемой ступени, уменьшается относительный брызгоунос.

Это позволяет принять рабочий диапазон скорости газа на КЭ [7] $U_в \leq 4{,}2$ м/с, что не является предельным значением. Значение коэффициента массоотдачи в газовой фазе в рекомендуемом диапазоне скоростей газа в испытанном КЭ не уступает полученным в предыдущих конструкциях КЭ РРА.

В целом следует считать, что КЭ РРА [7] является перспективной конструкцией, целесообразность промышленного использования которой вполне очевидна.

Список литературы

1. Сорокопуд, А.Ф. Технико-экономические предпосылки выбора рационального пылеуловителя / А.Ф. Сорокопуд, М.И. Даниленко, С.А. Максимов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. – № 10. – С. 64–66.

2. Сорокопуд, А.Ф. Концентрирование плодово-ягодных экстрактов в роторном распылительном испарителе / А.Ф. Сорокопуд, Н.Г. Третьякова, П.П. Иванов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2004. – № 7. – С. 38–40.

3. Сорокопуд, А.Ф. Использование роторного распылительного абсорбера для улавливания паров спирта при брожении / А.Ф. Сорокопуд, В.С. Козымаев // Совершенствование существующего и разработка нового оборудования для пищевой промышленности: сб. науч. работ / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Вып. 1. – Кемерово, 2006. – С. 3–5.

4. Сорокопуд, А.Ф. Совершенствование процессов пивоваренной промышленности с использованием роторного распылительного испарителя / А.Ф. Сорокопуд, А.В. Миленький; Кемеров. технол. ин-т пищ. пром-сти. – Кемерово, 2009. – Рус. – Деп. в ВИНИТИ 03.08.09, № 514-2009.

5. Сорокопуд, А.Ф. Применение системного анализа при исследовании роторных распылительных аппаратов // Совершенствование существующего и разработка нового оборудования для пищевой промышленности: сб. науч. работ / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Вып. 1. – Кемерово, 2006. – С. 24–29.

6. Сорокопуд, А.Ф. Исследование брызгоуноса в роторном распылительном аппарате / А.Ф. Сорокопуд, Е.А. Федоров, В.С. Черкасов, Л.Е. Рицберг // Теоретические основы химической технологии. – 2001. – Т. 35. – № 3. – С. 321–326.

7. Патент № 2342968. Роторный массообменный аппарат / Сорокопуд А.Ф., Тузовский Е.С.; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1.

8. Попов, Д.М. Совершенствование процесса дезодорации молока с использованием роторного распылительного испарителя: дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2003. – 159 с.

9. Козымаев, В.С. Исследование массообменных характеристик контактного элемента с целью создания высокоэффективного роторного распылительного аппарата: дис. … канд. техн. наук. – Кемерово, 2004. – 122 с.

10. Сорокопуд, А.Ф. Об увеличении скорости газа в роторном распылительном аппарате / А.Ф. Сорокопуд, Т.Г. Шевцова // Перспективные технологии и оборудование для пищевой промышленности. – Воронеж, 2004. – 154 с.

11. Сорокопуд, С.В. Разработка и исследование роторного распылительного скруббера для улавливания пыли пищевых продуктов: дис. … канд. техн. наук. – Кемерово, 2003. – 144 с.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

A.F. Sorokopud, D.S. Strizhkov, V.S. Kozymaev

INVESTIGATION OF A NEW CONTACT ELEMENT FOR THE ROTARY SPRAY APPARATUS

The influence of the gas speed on the mass transfer coefficient in the gas phase, entrainment and hydraulic resistance of the new contact element of the spray apparatus is investigated. The multideck entrainment separator with different geometrical parameters (the width, the installation pitch, and the angle of the plates' elevation) was tested. The allowable speed of the gas in the apparatus and construction of wall entrainment separator is substantiates. A comparative analysis of the results of similar studies is carried out.

Mass transfer, wetting, entrainment, hydraulic resistance, the load on gas.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru