

УДК 62-781.431

Исследование коэффициента массоотдачи в газовой фазе в роторном распылительном пылеуловителе

Плотников К.Б. plotnikov-kb@mail.ru

*Кемеровский технологический институт пищевой промышленности
650003 г. Кемерово пр. Ленинградский 30 кв. 32*

Исследовано влияние скорости газа, скорости истечения жидкости из отверстий распылителя, диаметра отверстий на коэффициент массоотдачи в газовой фазе роторного распылительного пылеуловителя (РП) диаметром 0,25 м. Использован метод испарения воды в воздух. Выполнен анализ стадий массоотдачи в РП.

Ключевые слова: массоотдача, мокрый пылеуловитель, режимные и конструктивные параметры.

Study mass transfer coefficient in the gas phase rotary spray dust collector

Plotnikov K.B. plotnikov-kb@mail.ru

Kemerovo Technological Institute of Food Industry

Investigation of the influence of the gas velocity, the velocity of the fluid from the hole spray diameter of the holes on the mass transfer coefficient in the gas phase of the rotary spray scrubber (RSS) with a diameter of 0.25 m was used method of evaporation of water into the air. The analysis of mass transfer stages in the RSS.

Keywords: mass transfer, wet dust collector, regime and design parameters.

Непрерывным условием эффективной работы мокрых пылеуловителей является высокоразвитая поверхность контакта фаз (ПКФ). В связи, с чем аппараты этой группы обеспечивают и абсорбцию примесей из очищаемых газов. В качестве орошающей жидкости в мокрых пылеуловителях часто используется вода. В этой связи использование в качестве модельной системы «вода-воздух» в условиях адиабатического испарения воды представляется оправданным, при исследовании коэффициента массоотдачи в газовой фазе.

В качестве объекта исследования принят РП (рис. 1) [1]. Отличительной его особенностью является многократная циркуляция жидкости внутри аппарата, т. е. способность работать в условиях самоорошения при подпитке свежей жидкостью необходимой на компенсацию уноса влаги с воздухом и с выгружаемым шламом. Однако массообмен в этом РП не изучался, стоит отметить [2, 3] в которых изучался массообмен в аппаратах близкой конструкции.

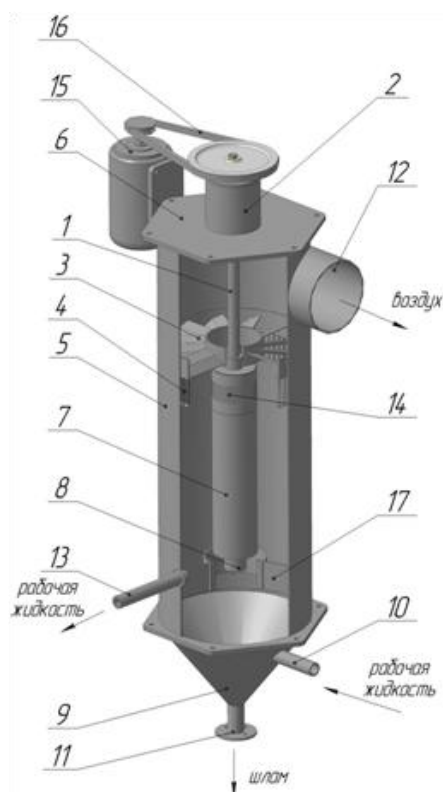


Рис. 1. Роторный распылительный пылеуловитель

Таким образом, цель работы - исследование коэффициента массоотдачи в газовой фазе в роторном распылительном пылеуловителе с внутренней циркуляцией и самоорошением рабочей жидкостью в зависимости от основных параметров: скорости газа, скорости истечения жидкости из распыливающих отверстий, диаметра этих отверстий, получение расчетной зависимости коэффициента массоотдачи и сравнительный анализ стадий массоотдачи в РРП.

Опытный образец РРП (рис. 1) содержит ротор, приводимый во вращение электродвигателем постоянного тока 15 через клиноременную передачу 16, подшипниковую опору 2, сепаратор 3, пристенный каплеотбойник 4, корпус 5, транспортирующий цилиндр 7 с заборным устройством 8. В нижней части РРП размещен бункер, представляющий собой - днище 9 конической формы, снабженное патрубками для подачи рабочей жидкости 10 и отвода шлама 11. На корпусе размещен патрубок 13 для поддержания определенного уровня рабочей жидкости в бункере. РРП также содержит: диспергирующее устройство – 14, успокоитель жидкости – 17. Подробное описание РРП представлено в [1, 4].

Очищаемый газ вводится по тангенциально установленному к корпусу патрубку выше бункера, но ниже распыливающих отверстий диспергирующего устройства (на рис. 1 патрубок не показан). Вследствие тангенциального ввода газ движется в РРП снизу вверх и совершает вращательное движение и также тангенциально выводится. Жидкость заборным устройством подается внутрь транспортирующего цилиндра и далее к диспергирующим отверстиям, через которые распыливается в свободное пространство в виде струй и капель. Достигнув стенки РРП капли касательно ударяются о пластинки пристенного каплеотбойника, которые установлены под углом $15 - 20^\circ$ к касательной к окружности диспергирующего устройства с шагом в 2 раза большим их ширины. В результате большая часть капель ударяется о пластинки, а остальные, в условиях близких к прямому удару - о корпус. Далее жидкость стекает по корпусу и собирается в бункере.

Таким образом можно выделить следующие стадии ПКФ в РРП (рис. 2): 1) при полете жидкости в свободном объеме аппарата; 2) при ударе о стенку; 3) на поверхности пластин пристенного каплеотбойника; 4) на поверхности вторичных капель, образовавшихся в зоне удара; 5) на поверхности пленки, стекающей от каплеотбойника в бункер; 6) на свободной поверхности жидкости в бункере; 7) на поверхности жидкости внутри транспортирующего цилиндра.

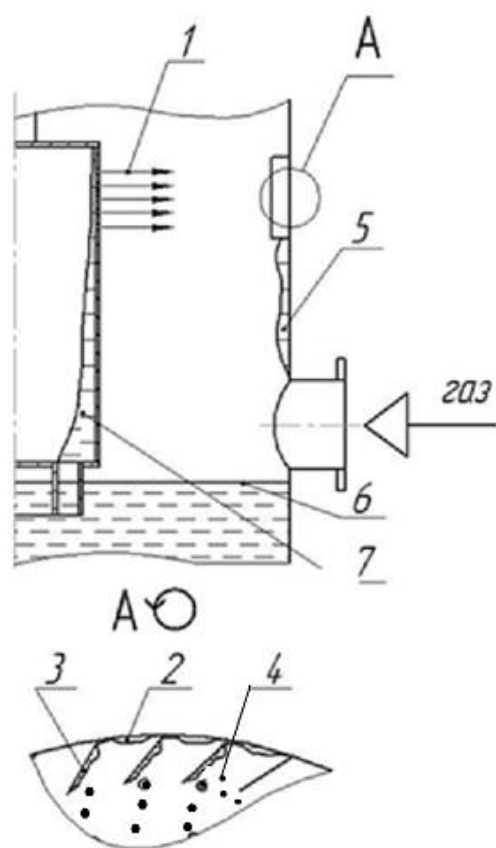


Рис. 2. Стадии массоотдачи в РРП

Таким образом массообмен в РРП осуществляется в сложной гидродинамической обстановке и протекает в несколько стадий. Анализ стадий представляется важным, поскольку дает возможность целенаправленно интенсифицировать процесс и обоснованно подходить к разработке новых конструкций. Анализ массообмена в РРП по стадиям методически целесообразен при нахождении расчетных уравнений.

Модельный образец РРП имеет диспергирующее устройство диаметром 0,075 м на поверхности которого распологаались в 6 рядов распыливающие отверстия диаметром $d=1,4...2,5$ мм с шагом окружным ($t_{окр}$) и осевым ($t_{ос}$)- $t_{ос}=t_{окр}=2,5d$. Скорость воздуха составляет 0,6-4,08 м/с. Частота вращения ротора принята $n=800-1000$ об/мин исходя из условий устойчивой работы РРП [4]. Скорость истечения жидкости рассчитывалась: $U_{ж}=\omega \cdot R$, где $\omega=\pi \cdot n/30$, c^{-1} ; R – радиус диспергирующего устройства, м.

На основании литературного обзора в [2] показано, что массообмен в роторных тарельчатых аппаратах близкой к РРП конструкции осуществляется в основном в две стадии: при полете капель в свободном объеме аппарата и при ударе. Аналогичные выводы сделали в [4]. Отмечено [2], что коэффициенты массообмена при полете капель в 10-20 раз превышают коэффициенты при обмене на свободной поверхности жидкости.

На основании проделанного анализа общее количество испарившейся влаги в РРП можно представить:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7, \text{ кг/ч} \quad (1)$$

где M_1-M_7 – масса испарившейся воды на соответствующей стадии, которая определяется:

$$M_i = \beta_i \cdot F_i \cdot d_i, \text{ кг/ч}, \quad (2)$$

где β_i – коэффициент массоотдачи на соответствующей стадии; F_i – поверхность контакта фаз на i -той стадии; d_i – движущая сила процесса.

В работах [2, 4] показана целесообразность использования для расчета коэффициента массоотдачи на первой стадии известного уравнения Фреслинга:

$$Nu_D = 2 \cdot (1 + 0,276Re^{0,5} \cdot Pr_D^{0,33}), \quad (3)$$

где $Nu_D = \beta^{(1)} \cdot d_k / D$ - диффузионное число Нуссельта; $Re = U_{ж} \cdot d_k / \nu$ - число Рейнольдса; $Pr_D = \nu / D$ - диффузионное число Прандтля; $\beta^{(1)}$ - коэффициент массоотдачи на стадии полета капель; d_k - средне - поверхностный диаметр капель в факеле распыла, определялся по данным [5]; D - коэффициент диффузии в газе; ν - кинематическая вязкость газа.

Поверхность контакта фаз, образованную распыленными каплями, определяли по формуле:

$$F_{(1)} = \frac{6 \cdot P_p \cdot \tau_k}{d_k}, \text{ м}^2, \quad (4)$$

где P_p - производительность диспергирующего устройства, $\text{м}^3/\text{с}$;

$$P_p = 0,73 \cdot f_0 \cdot \omega \cdot K \cdot \sqrt{R_B^2 - r_{cl}^2}, \quad (5)$$

где 0,73 - коэффициент скорости; f_0 - площадь сечения одного диспергирующего отверстия; K - общее число диспергирующих отверстий; R_B - внутренний радиус диспергирующего цилиндра; r_{cl} - средний радиус слоя жидкости внутри диспергирующего цилиндра; τ_k - время полета капли, с.

Коэффициенты массоотдачи на первой стадии практически не меняются при малых скоростях жидкости и существенно возрастают при $U_{ж} = 12$ м/с, когда в факеле распыла образуется большое количество капель диаметром менее 1 мм, при этом коэффициент массоотдачи на первой стадии не зависит от скорости газа в аппарате [2].

Коэффициент массоотдачи на стадии удара при определенных параметрах процесса может достичь 70% от общего [2].

В исследуемой конструкции основная часть капель факела распыла ударяется о пластинки пристенного каплеотбойника, поз. 4 (рис. 1), которые установлены на высоту факела. В результате капли факела касательно ударяются о поверхность пластин и их энергия затрачивается в основном на скольжение капель по пластинам и перемешивание пленки жидкости на них. Образование вторичных (отраженных) капель в зоне удара о пластинки минимальное. В зоне удара первичных капель о пластинки каплеотбойника и стенку аппарата наблюдается сложная гидродинамическая обстановка - соударение первичных и вторичных капель, дробление, интенсивная турбулизация пленки на стадиях 2 и 3. При увеличении скорости газа и жидкости наблюдается образование тумана, с увеличением скорости газа пленка жидкости, стекающая по поверхности пластин каплеотбойника турбулизуется и в ней возникают колебательные движения в виде волн [3]. Определение ПКФ на стадиях 2, 3 и 4 крайне затруднительно.

Массоотдача на стадии 5 (рис. 2) существенно зависит от скорости истечения жидкости из отверстий, т. е. от производительности диспергирующего устройства, поскольку с увеличением $U_{ж}$ происходит более интенсивное перемешивание пленки. Увеличение скорости газа в аппарате приводит к частичной деформации пленки жидкости на стадии 5 особенно вблизи ввода газа в аппарат. На стадии 6 поток газа деформирует свободную поверхность жидкости в бункере, ее раскручивание предотвращают лопасти успокоителя жидкости 17. ПКФ на стадии 7 незначительна, ее

поверхность достаточно ровная, поскольку энергия газового потока не оказывает на нее существенного влияния.

Можно предположить, что наибольшее количество испаренной влаги образуется на стадиях 1-4. Однако рассчитать это количество можно только для стадии 1.

Принимая во внимание результаты работ [2, 3] уравнение (1) можно представить в виде:

$$M = M_1 + M_{\Sigma}, \text{ кг/ч}, \quad (6)$$

где M_{Σ} – сумма влаги, испаренной на стадиях 2-7, кг/ч.

С целью определения суммарного коэффициента массоотдачи в модельном аппарате были выполнены эксперименты согласно методике изложенной в [6] в диапазонах изменения параметров указанных выше. Вода в РРП подавалась при температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Параметры воздуха на входе в РРП измерялись с помощью сухого и мокрого термометров типа ТЛ-4 с ценой деления $0,1^\circ\text{C}$ в диапазоне $0-50^\circ\text{C}$. На выходе из РРП параметры воздуха снимались с использованием измерителя температуры и влажности ИТ5-ТР-2 “Термит” с погрешностью измерения $\pm 2,5\%$. Воздух, подаваемый в РРП при необходимости подогревался, чтобы температура рабочей жидкости и показания влажного термометра не расходились более чем на 10°C [6]. Для обеспечения минимальной погрешности получаемых данных, воздух в РРП подавался с относительной влажностью не более 35% [6].

Измерения проводились после 7-10 минут устойчивой работы аппарата на заданных параметрах. Ошибка в определении коэффициента массоотдачи по данной методике не превышает 10...15% [6].

Ввиду отсутствия сведений о ПКФ на стадиях 2-7 в исследуемом аппарате определялся суммарный коэффициент массоотдачи отнесенный к диаметру РРП.

На рис. 3 представлена типичная зависимость β_{Σ} от U_r , для скоростей истечения жидкости 3,1 и 3,5 м/с характер зависимости аналогичен. Из представленных данных следует, что с увеличением скорости газа суммарный коэффициент массоотдачи возрастает, что можно объяснить возрастающей турбулизацией фаз на стадиях 2-7 особенно жидкой пленки.

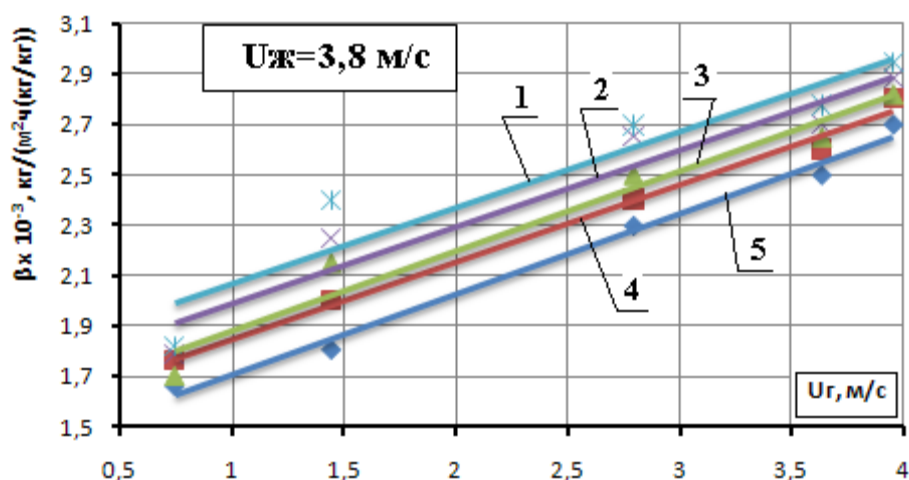


Рис. 3. Зависимость приведенного коэффициента массоотдачи от скорости газа в аппарате:

1 – $d_0=1,4$ мм; 2 – $d_0=1,7$ мм; 3 – $d_0=2$ мм; 4 – $d_0=2,2$ мм; 5 – $d_0=2,5$ мм

Суммарная площадь отверстий истечения при различных их диаметрах была одинакова, поэтому при неизменной скорости истечения $U_{ж}$ по мере увеличения d_0 возрастает диаметр капель в факеле [5] и на стадии 4. Это приводит к снижению суммарного коэффициента массоотдачи. Уменьшение d_0 , на наш взгляд, повышает турбулизацию пленки на стадиях 2, 3, поскольку уменьшается расстояние между ударяющимися каплями.

Увеличение скорости истечения жидкости позволяет увеличить приведенный коэффициент массоотдачи (рис. 4). В первую очередь увеличивается коэффициент массоотдачи на стадии 1, поскольку уменьшается средне - поверхностный диаметр капель от 2,65 до 1,6 мм в интервале $U_{ж} = 3,1-3,9$ м/с, но $\beta^{(1)}$ возрастает в данном диапазоне на 10-15%. Вероятно увеличение скорости $U_{ж}$ в большей степени сказывается на стадиях 2, 3.

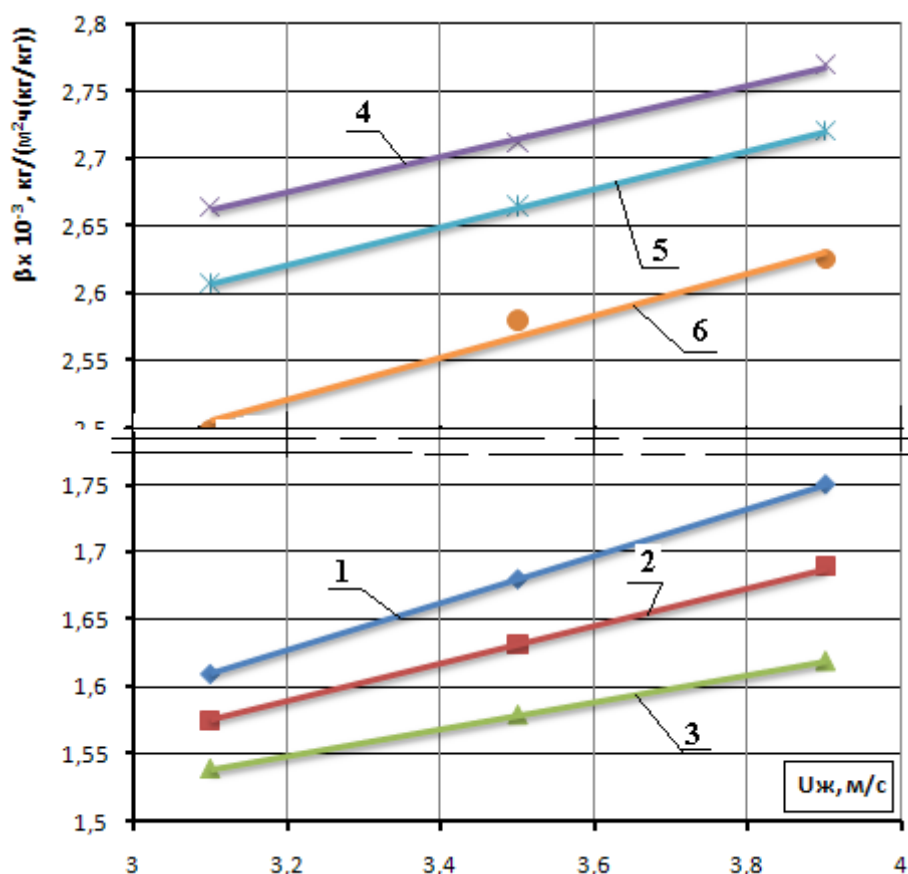


Рис. 4. Зависимость коэффициента массоотдачи от скорости жидкости:
 $U_{г} = 0,64$ м/с: 1 – $d_0=1,4$ мм; 2 – $d_0=2$ мм; 3 – $d_0=2,5$ мм;
 $U_{г} = 3,95$ м/с: 4 – $d_0=1,4$ мм; 5 – $d_0=2$ мм; 6 – $d_0=2,5$ мм

Анализ данных на рис. 5 показывает, количество влаги испарившейся при полете капель на 1 кг газа составляет 40-55% от общего количества влаги испарившейся в аппарате. Эти данные подтверждают значимость стадии 1. Однако $U_{ж}$ была не высокой

при ее увеличении вклад стадии 1 в суммарное значение, испаренной в РРП влаги снизится.

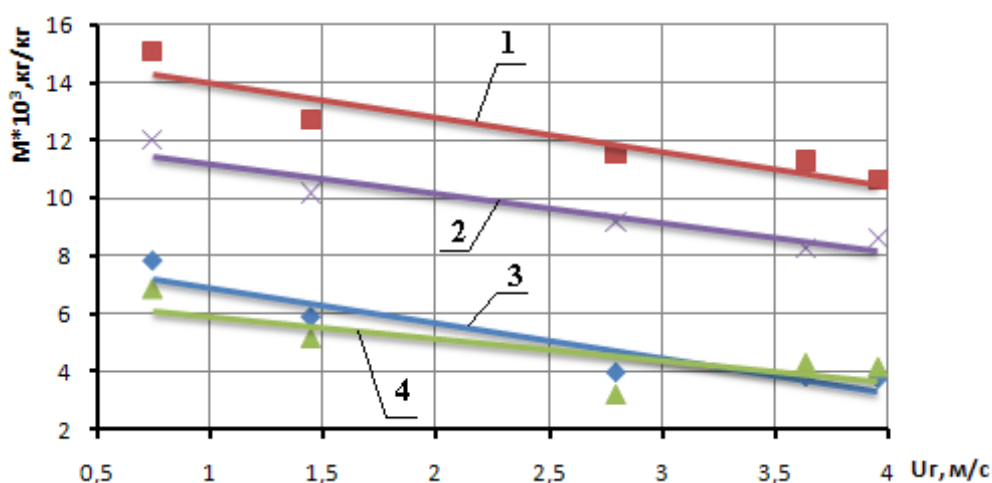


Рис. 5. Зависимость количества испарившейся влаги от скорости газа:
 1 – $U_{ж} = 3,9$ м/с; 2 – $U_{ж} = 3,1$ м/с (суммарное для всех стадий);
 3 – $U_{ж} = 3,9$ м/с; 4 – $U_{ж} = 3,1$ м/с (для стадии полета капель)

В результате обработки экспериментальных данных была получена зависимость:

$$\beta_r = (7,89 + 0,797 \cdot d_0 + 1,411 \cdot U_r + 3,217 \cdot U_{ж}) \cdot 10^2, \quad (7)$$

Коэффициент корреляции $R=0,95$. Данное уравнение справедливо при $d_0=1,4-2,5$ мм; $U_r=0,6-3,95$ м/с; $U_{ж}=3,1-3,9$ м/с.

Сравнение результатов с данными работы [3], которые были получены на КЭ диаметром 0,25 м и распылителе диаметром 0,075 м с 10 рядами отверстий диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ м частотой вращения 1500 об/мин, показывает следующее. Максимальная скорость воздуха в [3] составляла 4,2 м/с, при этом в условиях увлажнения при рациональных параметрах $\beta_{\Sigma} = 9$ кг/(м²·ч(кг/кг))·10⁻³. Дальнейшее увеличение скорости газа лимитировалось интенсивным брызгоуносом. В настоящей работе при $U_r = 3,95$ м/с $\beta_{\Sigma} = 3,1$ кг/(м²·ч(кг/кг))·10⁻³. Меньшее значение β_{Σ} объясняется тем, что в данной работе использовалось меньшее количество отверстий ДУ и меньшая скорость истечения жидкости, а следовательно и меньшая производительность.

С точки зрения эффективной пылеочистки достаточно 6 рядов отверстий. Дальнейшими путями повышения эффективности массоотдачи в РРП следует считать увеличение скорости истечения жидкости, увеличение числа распыливающих отверстий.

Список литературы:

1. Пат. № 229610 Российская Федерация. МПК⁷ В 01 D 47/16. Роторный пылеуловитель / А.Ф. Сорокопуд, Н.М. Горячкина, И.Е. Бельдяев; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. - № 2005110312/15; заявл. 08.04.05; опубл. 10.04.07, Бюл. № 23.
2. Авруцкий, М.М. Исследование стадий массоотдачи в роторном тарельчатом аппарате: дис... канд. техн. наук / Авруцкий Михаил Михайлович – Москва, 1972. – 120 с.

3. Сорокопуд, А.Ф. Исследование работы нового контактного элемента роторного распылительного аппарата / А.Ф. Сорокопуд, Д.С. Стрижков, В.С. Козымаев // Техника и технология пищевых производств. – 2012. - №4. – С. 120-125.

4. Сорокопуд А.Ф. Исследование брызгоуноса в роторном распылительном пылеуловителе / А.Ф. Сорокопуд, К.Б. Плотников, Д.В. Резик, Д.Б. Иванова // Ползуновский вестник. – 2013. - №3. – С. 303-308.

5. Трошкин О.А. Распад струи жидкости вытекающей из отверстия в стенке вращающегося цилиндра / О.А. Трошкин, А.А. Плановский, Ю.И. Макаров// Теоретические основы химической технологии. – 1972. – Т.6. - №4. – с. 640-643.

6. Лукьяненко Т.В. Методика определения коэффициента массоотдачи при испарении воды в поток воздуха на контактных устройствах / Т.В. Лукьяненко, И.А. Никишкин, С.И. Якушко, Ю.Н. Скрынник // Очистка промышленных выбросов и утилизация отходов. Межвузовский сборник научных трудов. – Л.: Изд-во ЛТИ, 1985. – с. 146-149.