

Определение условий вывода дисперсной фазы из рабочей зоны вихревой камеры с разбрызгивающим устройством

В.В. Харьков^{1а}, О.С. Дмитриева^{1, 2б}

¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, Россия

² Казанский государственный аграрный университет, ул. К. Маркса, 65, Казань, Россия

^а v.v.kharkov@gmail.com, ^б ja_deva@mail.ru.

^а <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6221-0167>

Статья поступила 10.04.2026, принята

Рассмотрена актуальная задача интенсификации процессов газожидкостного взаимодействия за счёт применения вихревых аппаратов в сочетании с интенсивным распылением технологической жидкости в рабочую зону. Целью исследования является определение условий эффективного вывода дисперсной фазы из рабочей зоны вихревой камеры с коническим разбрызгивающим устройством. Проведено численное исследование движения капель к равновесному радиусу при различных режимных и геометрических параметрах работы устройства. Установлены зависимости относительного радиуса равновесных траекторий капель от их диаметра, угла наклона лопаток завихрителя (живого сечения завихрителя) и радиуса аппарата. Показано, что для обеспечения вывода капель с диаметром меньше критического значения необходимо профилировать крышку камеры с возрастающей функцией $rH^2(r)$. Для того чтобы капли определённого размера были взвешены в приосевой зоне вихревой камеры, необходимо, чтобы размер капель был небольшим (< 100 мкм), они быстрее достигают равновесного радиуса. Если капли крупнее ($100–200$ мкм), удерживать их у оси можно только за счёт увеличения радиуса аппарата или уменьшения крутки потока за счёт увеличения угла θ на лопатках. Установлено, что увеличение радиуса вихревой камеры при сохранении прочих параметров снижает эффективность центробежной сепарации, так как каплям требуется больше времени или более сильная закрутка для достижения стенки. Начальная скорость капель при распределении с перегородок разбрызгивающего устройства слабо влияет на траектории капель в пределах значений скоростей $1–10$ м/с. Сформулированы общие рекомендации по проектированию вихревых камер с разбрызгивающим устройством.

Ключевые слова: вихревая камера; разбрызгиватель; сепарация жидкости; критический размер капли; движение капли.

Determination of conditions for the removal of the dispersed phase from the working zone of the vortex chamber with a sprayer device

V.V. Kharkov^{1а}, O.S. Dmitrieva^{1, 2б}

¹ Kazan National Research Technological University; 68, K. Marks St., Kazan, Russia

² Kazan State Agrarian University; 65, K. Marks St., Kazan, Russia

^а v.v.kharkov@gmail.com, ^б ja_deva@mail.ru.

^а <https://orcid.org/0000-0002-8219-7323>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6221-0167>

Received 10.04.2026, accepted 24.04.2026

The paper addresses the problem of intensifying gas-liquid interaction by using vortex devices in combination with intensive atomization of process fluid into the working zone. The purpose of the study is to determine the conditions for the efficient removal of the dispersed phase from the working zone of a vortex chamber equipped with a conical spraying device. A numerical study of droplet motion toward the equilibrium radius is carried out for various operating conditions and geometric parameters of the device. The dependences of the relative equilibrium trajectory radius of droplets on their diameter, the blade angle of the swirler (its open area) and the apparatus radius are obtained. It is shown that, to ensure the removal of droplets with a diameter smaller than a critical value, the chamber lid must be profiled so that its height $rH^2(r)$ is an increasing function of the radius r . In order for droplets of a given size to remain suspended in the near-axis region of the vortex chamber, their size must be small (< 100 μm), in which case they reach the equilibrium radius faster. If the droplets are larger ($100–200$ μm), they can be retained near the axis only by increasing the apparatus radius or by reducing the swirl intensity through increasing the blade angle θ . It is established that increasing the radius of the vortex chamber while keeping the other parameters fixed reduces the efficiency of centrifugal separation, since droplets require more time or a stronger swirl to reach the wall. The initial velocity of droplets injected from the baffles of the spraying device has little effect on their trajectories within the velocity range $1–10$ m/s. General recommendations for the design of vortex chambers with spraying devices are formulated.

Keywords: vortex chamber; spraying device; liquid separation; critical droplet size; droplet motion.

Введение и обзор литературы по теме исследования. Интенсификация межфазного взаимодействия в системах «газ–жидкость» является определяющим факто-

ром эффективности работы аппаратов для очистки газовых выбросов, тепломассопереноса, сушки и концентрирования дисперсных систем. Применение закручен-

ных потоков позволяет увеличить относительную скорость фаз и время их контакта, что приводит к росту интенсивности массообмена. В работе [1] экспериментально подтверждена возможность достижения нескольких теоретических ступеней массообмена в одной ступени распыла в вихревом противоточном аппарате за счёт увеличения периферийной скорости газа. При этом показано, что соотношение геометрических параметров камеры (высота/радиус менее 0,6–0,7) является критическим условием формирования устойчивого плоского вихревого противотока.

Развитие подходов к описанию многофазных процессов рассмотрено в работе [2], где предложена математическая модель разделения дисперсных сред в вихревой трубе с учётом процессов конденсации, роста и повторного испарения капель. Установлено, что эффективность массо- и энергоразделения определяется диаметром капель и их массовым расходом, причём оптимальные значения соответствуют субмикронному диапазону (0,2–0,4 мкм). Это указывает на необходимость управления дисперсным составом для повышения эффективности процессов.

Эффективность циклонов и скрубберов снижается при улавливании частиц размером менее 10–15 мкм вследствие недостаточной интенсивности межфазного взаимодействия [3]. В вихревых аппаратах центробежные силы и повышенные относительные скорости фаз обеспечивают высокую эффективность улавливания для частиц 3–5 мкм. Согласно экспериментальным данным [3], коэффициент крутки потока существенно влияет на аэродинамическое сопротивление аппарата, что необходимо учитывать при его проектировании.

Исследования мокрой газоочистки направлены на совершенствование конструкций аппаратов и повышение эффективности улавливания мелкодисперсных частиц. Согласно обзору [4], сочетание инерционного, диффузионного и центробежного механизмов позволяет повысить степень очистки и одновременно снизить экологическую нагрузку и эксплуатационные затраты. Физической основой мокрой очистки является инерционное улавливание частиц каплями жидкости. В работе [5] на основе прямого численного моделирования показано, что эффективность захвата определяется числами Рейнольдса и Стокса, а также характером вихреобразования в потоке. В диапазоне $270 < Re < 1000$ наблюдается срыв вихрей, приводящий к колебаниям интенсивности осаждения частиц, тогда как средние характеристики улавливания определяются усреднённой структурой течения, что позволяет использовать обобщённые зависимости при расчётах.

Работа каплеуловителей в аппаратах мокрой газоочистки определяется режимами взаимодействия фаз. В исследовании [6] показано, что образование аэрозольного уноса связано с интенсивностью взаимодействия газа и жидкости, а эффективность сепарации мелкодисперсных капель определяется конструкцией и режимом работы каплеуловителей.

Движение дисперсной фазы в газовом потоке определяет эффективность улавливания. В работе [7] разработана математическая модель циркуляционного движения капли, согласно которой её вращение приводит

к увеличению времени релаксации за счёт снижения коэффициента аэродинамического сопротивления. Показано, что уравнение движения капли связано с уравнением диффузии завихренности, а увеличение угловой скорости вращения приводит к росту эффективного числа Рейнольдса и улучшению условий коагуляции частиц.

Структура закрученного течения влияет на распределение скоростей и перенос импульса в потоке. Авторами [8] получено аналитическое решение для функции тока в винтовом канале на основе комбинации функций Бесселя и Ломмеля, что позволяет учитывать влияние геометрии канала на характеристики закрученного течения. Аналогичные закономерности проявляются и в аппаратах мокрой газоочистки, в том числе вихревого типа. Численное моделирование многофазных потоков позволяет описывать структуру течения и прогнозировать характеристики аппаратов. Согласно [9] структура течения в мокрых скрубберах существенно зависит от конфигурации входа газа, при этом турбулентность и межфазное взаимодействие определяют распределение скоростей и эффективность очистки. В работе [10] исследовано взаимодействие двух встречных закрученных потоков, при котором формируется область выравнивания центробежных сил. Установлено, что траектории движения частиц изменяются в зависимости от структуры течения, что влияет на процессы сепарации и классификации.

Сочетание нескольких механизмов улавливания эффективно, что подтверждено экспериментально. В работе [11] установлено, что при столкновении жидких струй образуются мелкие капли, увеличивающие вероятность инерционного захвата частиц. Эффективность очистки достигла 92 % для частиц размером 1 мкм и превысила 95 % для частиц 10 мкм; закручивание потока дополнительно усиливает осаждение. Численное моделирование [12] показало наличие зон обратных токов в аппаратах с коаксиальными трубами. Эти зоны служат транспортными каналами для частиц и влияют на селективность разделения.

В исследовании [13] на основе анализа структуры течения в вихревой камере получена зависимость коэффициента расхода от геометрических параметров. Также установлена возможность применения вихревой камеры в качестве гасителя пульсаций давления, что расширяет диапазон её использования. Распределение жидкой фазы в аппарате определяет эффективность улавливания частиц. В работе [14] показано, что особенности течения жидкости в аппаратах центробежного типа зависят от режима работы и нагрузки, определяя эффективность процессов очистки.

Процессы тепломассопереноса в каплях рассмотрены в работе [15], где разработана модель высокотемпературной сушки с учётом двухфазной зоны испарения. Показано, что температурные поля внутри капли и траектория её движения определяют кинетику процесса и влияют на выбор геометрических параметров аппарата.

Исследования [16] показывают, что применение демистеров позволяет существенно снизить унос капель и повысить эффективность очистки до 95–97 %, при этом распределение скоростей газа внутри аппарата

определяет перенос частиц и эффективность их улавливания.

Фундаментальные аспекты вихревых течений рассмотрены в работе [17], где установлено, что в цилиндрическом слое возможно формирование интенсивной азимутальной составляющей скорости, превышающей радиальную, что определяет распределение давления и структуру потока.

Практические аспекты применения мокрых скрубберов рассмотрены авторами [18], показавшими, что внедрение мокрой стадии в существующие системы газоочистки приводит к снижению расхода реагентов и образования меньшего количества отходов при сохранении высокой эффективности очистки.

В работах [19, 20] предложены инженерные методы расчёта вихревых камер с тангенциально-лопаточным завихрителем потока газа, учитывающие их конструктивные особенности, режим работы и характеристики закрученного потока, включая равновесный радиус капли.

Эффективность процессов в вихревых аппаратах определяется совместным влиянием геометрических параметров, режимных характеристик и структуры многофазного потока. Однако обобщённые аналитические зависимости, связывающие критический размер капли с геометрией вихревой камеры (радиус, профиль высоты, площадь живого сечения завихрителя) и режимными параметрами (расход газа, угол наклона лопаток) в условиях вывода дисперсной фазы из рабочей зоны, в литературе отсутствуют. Данное обстоятельство затрудняет инженерный расчёт и оптимизацию аппаратов данного типа.

Следовательно, цель настоящей работы – определить условия движения и вывода дисперсной жидкой фазы из вихревой камеры с коническим разбрызгивающим устройством.

Методика исследования. В настоящей работе рассматривается вихревая камера с центральным разбрызгивающим устройством коническим, выходным сепарационным патрубком сверху и встречным движением фаз.

Принцип действия вихревой камеры с центральным разбрызгивающим устройством [21] основан на интенсификации взаимодействия между газовой и жидкой фазами за счёт создания сложного вихревого течения и высокой степени диспергации (рис. 1).

Газовая среда поступает через лопаточно-тангенциальный завихритель, формируя устойчивый вихрь в рабочей зоне устройства. Жидкость подводится в камеру снизу посредством входного патрубка непосредственно на разбрызгивающее устройство. Конструкция разбрызгивателя выполнена в виде конусной насадки с многоуровневыми пластинами, ориентированными навстречу потоку жидкости, что обеспечивает формирование объёмного факела распыла, охватывающего значительную часть рабочего объема камеры за счёт вторичного ударного дробления. За счёт аэродинамического сопротивления происходит начальное дробление жидкости на капли. Капли вовлекаются во вращательный поток газа, внутри камеры формируется вращательный газо-жидкостный слой. В этом слое капли соударяются с кромками лопаток, благодаря чему жидкость в этой зоне

находится намного дольше, чем в факеле распыла над разбрызгивателем жидкости в осевой зоне.

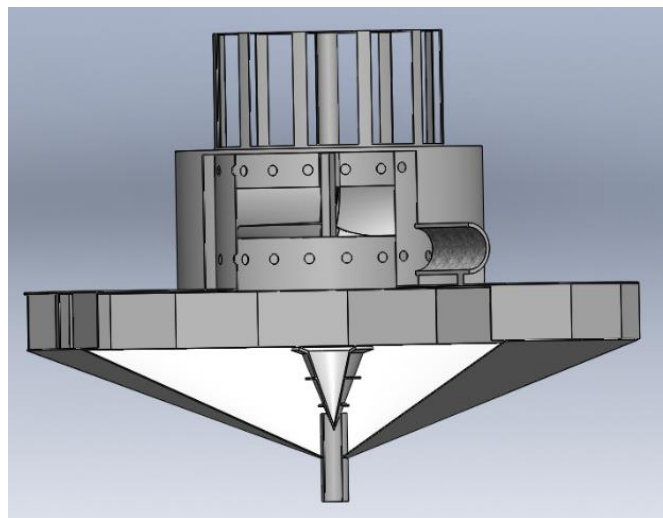


Рис. 1. Упрощённый вид вихревой камеры с разбрызгивающим устройством в разрезе

Сочетание высокой относительной скорости движения смеси и увеличенного времени пребывания капель в рабочей зоне приводит к тому, что достигается максимально возможная эффективность процесса. Поскольку вихревая камера не оборудована нижним отводом жидкости (сливом), необходимо обеспечить транспортирование капель жидкости с размерами менее определенного размера в центральную область камеры для дальнейшего их отвода через центральный патрубок в верхней части камеры. В частности, остаются неопределёнными: критический диаметр капли, при котором капля не взвешивается у стенки, а выносятся к центральному патрубку; влияние профиля крышки камеры (высоты по радиусу) на транспорт капель; диапазон нагрузок по жидкости и газу, при которых возможен устойчивый вывод фазы без захлебывания.

Таким образом, контакт фаз внутри камеры завершается выходом газокapельной смеси сверху камеры, дальнейшее разделение фаз осуществляется в сепарационном блоке. Под действием центробежных сил и инерции основная масса капельной влаги оседает на стенках перфорированного патрубка, формируя сплошную плёнку. Данная плёнка проникает сквозь отверстия в патрубке, стекает в кольцевой зазор и окончательно удаляется из аппарата через штуцер отвода жидкости. Обезвоженный газ продолжает восходящее движение и окончательно удаляется через прямоугольные щели центрального штуцера в атмосферу, не допуская повторного захвата влаги.

В задачи исследования входит разработка аналитической зависимости для определения критического диаметра капли $a_{кр}$, при котором радиус равновесной траектории равен радиусу вихревой камеры, т. е. капля взвешивается у стенки. Капли диаметром более $a_{кр}$ превышают радиус рабочей зоны и соответственно сталкиваются с лопатками завихрителя, что позволяет их обратно вернуть в рабочую зону вихревой камеры. Затем для капель меньше значения $a_{кр}$ нужно обеспечить их

распределение к центру и далее в центральный выходной патрубок в блок сепарации.

Движение одиночной капли определяется известной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dU_r}{d\tau} &= \frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{3}{4} \frac{\rho_\Gamma}{\rho_\kappa} c_a \frac{U_{\text{отн}}}{a} (W_r - U_r), \\ \frac{dU_\varphi}{d\tau} &= -\frac{U_r U_\varphi}{r} + \frac{3}{4} \frac{\rho_\Gamma}{\rho_\kappa} c_a \frac{U_{\text{отн}}}{a} (W_\varphi - U_\varphi), \\ \frac{dU_z}{d\tau} &= g + \frac{3}{4} \frac{\rho_\Gamma}{\rho_\kappa} c_a \frac{U_{\text{отн}}}{a} (W_z - U_z), \\ \frac{dr}{d\tau} &= U_r, \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{U_\varphi}{r}, \quad \frac{dz}{d\tau} = U_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где c – коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ – плотность, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; U – скорость жидкости, м/с; W – скорость газа, м/с; нижние индексы: отн – относительное значение; a – капля; Γ – газ; κ – жидкость; r – проекция на радиус; z – проекция на ось камеры; φ – тангенциальная составляющая.

При движении в закрученном потоке на каплю действуют центробежная сила и сила аэродинамического сопротивления, обусловленная радиальным течением газа к центру. Тогда условие равновесия имеет вид

$$U_r = 0; \quad U_\varphi = W_\varphi; \quad \frac{dU_r}{d\tau} = 0.$$

Таким образом, требуется определить условие, при котором сила аэродинамического сопротивления превышает центробежную силу, чтобы капля двигалась к центру. Для капли, движущейся с нулевой радиальной скоростью, уравнение баланса преобразуется. Тогда с учётом геометрии вихревой камеры можно получить условие равновесия капли на стенке вихревой камеры ($r = R$):

$$a_{\text{кр}} = \frac{3c_a \rho_\Gamma A_c^2}{16\pi^2 R H_0^2 (\rho_\kappa - \rho_\Gamma) \cos^2 \theta}, \quad (2)$$

где A_c – площадь живого сечения завихрителя, м²; H_0 – высота камеры, м; R – радиус камеры, м; θ – угол наклона лопаток к касательной.

Получается, чтобы капли не накапливались в вихревой камере, радиус равновесной траектории должен быть меньше радиуса выходного патрубка, т. е. должно соблюдаться определённое соотношение составляющих скоростей на входе в камеру, которое определяется расходом газа и геометрическими параметрами завихрителя

$$\frac{3\rho_\kappa a W_\varphi^2}{4\rho_\Gamma c_a W_r^2} < 1 \quad (3)$$

при $R_{\text{вых}} < r < R$.

Принимая во внимание, что вне завихрителя сохраняется момент импульса без учёта вязкости, тогда скорость на радиусе r определяется выражением

$$W_\varphi = W_{\varphi R} \frac{R}{r}. \quad (4)$$

Поскольку объёмный расход газа и геометрия тангенциально-лопаточного завихрителя определяют поле скоростей на входе в рабочую зону, получаем, что

$$W_{\varphi R} = \frac{Q_\Gamma}{A_c} = \frac{Q_\Gamma}{\pi R^2 \left(1 - \frac{n_l \delta_l}{2\pi R \cos \theta}\right)}, \quad (5)$$

где Q_Γ – объёмный расход, м³/с; n_l – число лопаток; δ_l – толщина лопаток, м.

Радиальная составляющая скорости газа в произвольном сечении вихревой камеры определяется, исходя из постоянства расхода через сечения

$$W_r = \frac{Q_\Gamma}{2\pi r H(r)}, \quad (6)$$

где $H(r)$ – высота вихревой камеры на радиусе r , м.

Получаем условие вывода дисперсной фазы $a < a_{\text{кр}}$, чтобы капля не имела равновесного радиуса внутри камеры, необходимо увеличение радиальной составляющей скорости газа на всём пути от стенки к центру аппарата, что достигается профилированием крышки вихревой камеры так, чтобы функция $f(r) = rH^2(r)$ была возрастающей в интервале от радиуса выходного патрубка $R_{\text{вых}}$ до стенки R , причём предполагается, что расход газа равномерно распределён по высоте камеры

$$\frac{d}{dr}(rH^2(r)) < 0. \quad (7)$$

Условие монотонного возрастания профиля выглядит как

$$H'(r) > 0. \quad (8)$$

Интегрирование условия (8) даёт ограничение на профиль высоты камеры

$$H(r) < H_0 \sqrt{\frac{R}{r}}. \quad (9)$$

Причём если высота изменяется по степенному закону $H(r) < H_0 \left(\frac{r}{R}\right)^k$, то условие (8) выполняется при $k \leq 0,5$. Значение k является задаваемым для конкретной камеры.

Объединяя все соотношения, получаем итоговую зависимость для проектирования вихревой камеры

$$\left(\frac{a}{a_{\text{кр}}}\right)^{1,6} \frac{H(r) R}{H_0 r} = 1. \quad (10)$$

В этом случае вывод капель возможен для частиц небольшого диаметра, тогда критический размер капель должен определяться из условия, что $a_{\text{кр}} = R_{\text{вых}}$. Исходя из этого условия, что $r = R_{\text{вых}}$ и коэффициент аэродинамического сопротивления определяется как $c_a = \frac{18,5}{\text{Re}^{0,6}}$,

где Re – число Рейнольдса для внешней задачи обтекания капли газом ($2 < \text{Re} < 500$), получаем в безразмерном виде

$$\frac{a_{кр}}{R} = \frac{K}{H_0^{0,875}} \left(\frac{R_{вых}}{R} \right)^{1-0,875k} \quad (11)$$

где произведена замена

$$K = \left(\frac{13,875 \mu^{0,6} \rho_r^{0,4} Q_r^{1,4}}{(2\pi)^{1,4} (\rho_{ж} - \rho_r) W_{\varphi R}^2 R^2} \right)^{1/1,6}$$

Таким образом, уменьшение радиуса патрубка приводит к снижению критического диаметра.

Результаты исследований. Расчёты проведены для условий системы воздух–вода, когда диспергируются капли от 25 до 500 мкм, в камере от 0,5 до 1 м, радиальная скорость у лопаток изменялась от 5 до 20 м/с, соотношение расходов фаз от 0,25 до 0,75 л/м³, завихритель имел 16 лопаток. Базовые параметры: радиус камеры 0,5 м, скорость газа на входе в завихритель 15 м/с, параметр $k = 0,5$, начальная скорость капель 1 м/с, угол наклона лопаток к касательной 30°. Расчёт проводился путём последовательных приближений по методу дихотомии. Результаты исследований представлены графически (рис. 2, 3).

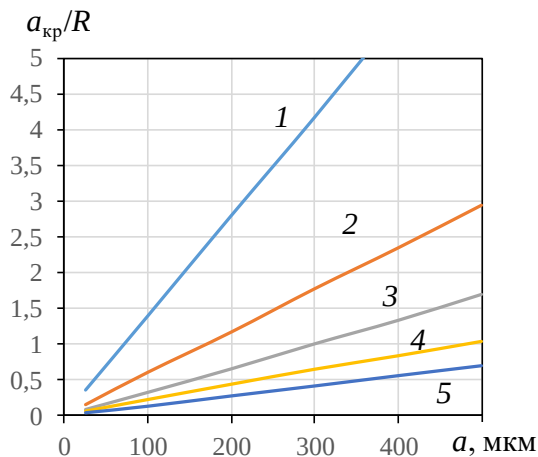


Рис. 2. Относительный радиус траекторий капель при θ , °: 1 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40

Расчёт показал, что положение траекторий сильно зависит от угла наклона лопаток, уменьшение угла наклона лопастей завихрителя приводит к снижению крутки газожидкостного потока (рис. 2). Для всех углов θ наблюдается линейная зависимость, по мере увеличения угла наклон кривых уменьшается. Таким образом, в аппарате взвешиваются лишь очень мелкие капли с диаметром меньше 50 мкм при тангенциальном расположении лопаток. Если траектория проходит внутри $R_{вых}$, капля улетит через центральный патрубок выхода. Мелкие капли (в диапазоне 100–200 мкм) остаются ближе к оси завихрителя. У всех остальных капель равновесный радиус траектории больше радиуса выходного патрубка, а значит капли будут оседать внутри и приводить к захлёбыванию. При больших углах 30–40° равновесные траектории капель смещаются к центру вихревой камеры, что улучшает условия для их вывода из камеры (капли могут унести потоком через центральный патрубок).

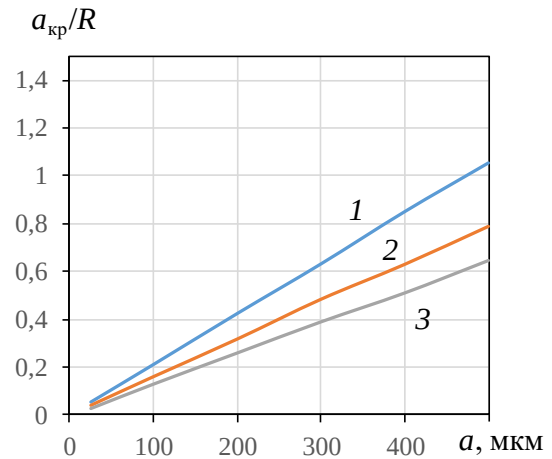


Рис. 3. Относительный радиус траекторий капель при R , м: 1 – 0,5; 2 – 0,75; 3 – 1

Зависимость демонстрирует поведение капли в вихревой камере, так, с увеличением диаметра капли относительный радиус её траектории увеличивается, т. к. под действием центробежной силы крупные капли стремятся на периферию (рис. 3). Увеличение радиуса приводит к снижению относительных радиусов взвешивания капель, а увеличение скорости приводит к их увеличению. Увеличение подачи жидкости в аппарат также приводит к изменению соотношения центробежной силой и силой аэродинамического сопротивления, действующих на капли, и как следствие, к изменению положения равновесных траекторий капель. Чтобы капли не улетели к периферии вихревой камеры, выгоден большой радиус аппарата, что обеспечит лучшее удержание капель в центральной осевой зоне.

Таким образом в аппарате могут взвешиваться только капли диаметром менее 200 мкм, в противном случае они не подлежат выводу сверху аппарата и будет захлёбывание аппарата, таким образом существует и ограничение по нагрузке фаз по воздуху и воде в диапазоне L/G до 0,6.

Для указанных условий были получены характеристики движения капель во времени их выхода на равновесные траектории. Система уравнений (1) решалась численно четырёхшаговым методом Рунге-Кутты с начальными условиями: $\tau = 0$; $r = R_0$; $\varphi = 0$; $z = 0$; $U_r = U_0$; $U_\varphi = 0$; $U_z = 0$, где нижние индексы: 0 – начальный параметр. В расчётах учитывается, что движение капли осуществляется с приосевой зоны вихревой камеры, характер распределения жидкости зависит от геометрии разбрызгивающего устройства в зависимости от числа рядов пластин.

При подаче жидкости разбрызгивающим устройством из приосевой зоны вихревой камеры все капли достигают равновесной траектории независимо от положения начальной точки своего движения (рис. 4). Причём и начальная скорость истечения капель слабо влияет на траекторию их движения (при изменении скорости движения в диапазоне 1–10 м/с). Характерно то, что амплитуда движения хоть и большая при большей скорости подачи капель в вихревую камеру, однако капли стабилизируются на равновесной траектории за аналогичный промежуток времени, что и капли, двигающиеся с меньшей скоростью.

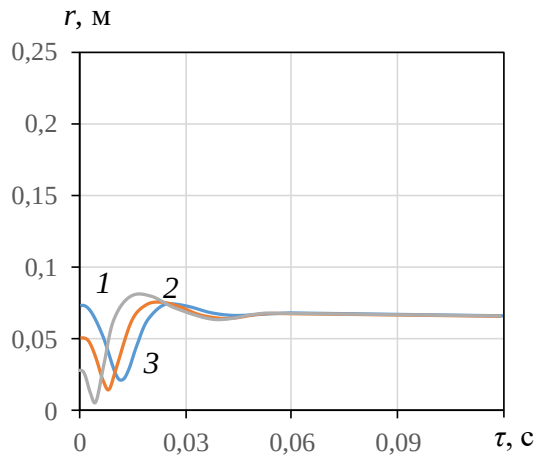


Рис. 4. Движение капель диаметром 200 мкм, распределённых разбрызгивающим устройством, к равновесному радиусу во времени при начальном радиусе подачи R_0 , м: 1 – 0,03; 2 – 0,05; 3 – 0,07; $L/G = 0,5$ л/м³; $R = 0,5$ м, $\theta = 30^\circ$; $U_0 = 1$ м/с; $W = 15$ м/с

Характер кривых (рис. 4) колебательно-затухающий, что связано с динамикой взаимодействия капель с газовым потоком и процессами релаксации до достижения равновесного состояния после 0,06 с.

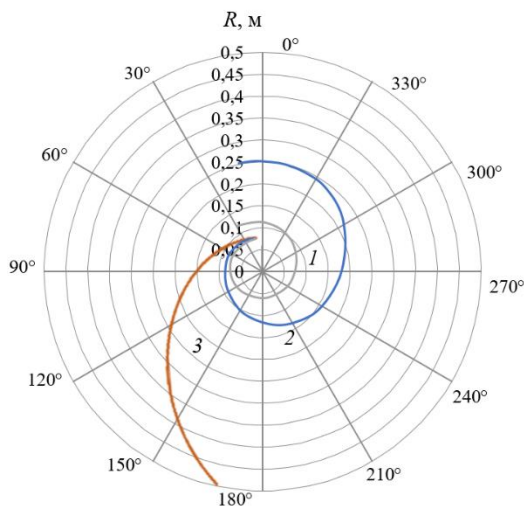


Рис. 5. Проекция траекторий капель на поперечное сечение вихревой камеры, a , мкм: 1 – 50; 2 – 150; 3 – 250; $L/G = 0,5$ л/м³; $R = 0,5$ м, $R_0 = 0,07$ м, $\theta = 30^\circ$; $U_0 = 1$ м/с; $W = 15$ м/с

Исследования по распределению капель в вихревой камере проводились для разных способов подачи жидкости, исходя из конструктивных особенностей конического разбрызгивающего устройства. На представленном графике в полярных координатах показаны траектории движения капель разного диаметра в закрученном потоке, видно, что мелкие капли двигаются по более коротким траекториям к равновесному радиусу (рис. 5), они обладают малой инерцией и увлекаются потоком газа, оставаясь ближе к оси. Чем больше диаметр капли,

тем за более быстрый период времени она достигает периферии аппарата, концентрация капель снижается.

Таким образом, комбинированная подача жидкости с разных уровней перегородок разбрызгивающего устройства позволяет сделать объём факела распыла более заполненным, в то же время, не препятствуя выводу дисперсной фазы из рабочей зоны вихревой камеры

Закключение. На основании полученных результатов исследования были определены условия вывода дисперсной фазы из рабочей зоны вихревой камеры с разбрызгивающим устройством. Изучено движение капель к равновесному радиусу при различных режимных параметрах работы устройства. Общие рекомендации по проектированию вихревой камеры можно сформулировать исходя из следующих выводов:

1. Для обеспечения вывода капель с диаметром меньше значения $a_{кр}$ необходимо спрофилировать крышку камеры так, чтобы функция $rH^2(r)$ была возрастающей. Простейший вариант исполнения – коническая крышка с образующей $H(r) \propto r^k$, $k \leq 0,5$.

2. Критический диаметр можно регулировать изменением живого сечения завихрителя и высоты камеры на периферии.

3. При расчётах рекомендуется использовать итерационный подход, уточняя коэффициент аэродинамического сопротивления по текущему числу Рейнольдса для каждого диаметра.

4. Увеличение радиуса вихревой камеры (при сохранении прочих параметров потока) снижает эффективность центробежной сепарации относительно размера камеры. В большом аппарате каплям требуется больше времени или более сильная закрутка, чтобы долететь от оси до стенки.

5. При уменьшении диаметра капель площадь межфазного контакта возрастает на порядки, что приводит к значительному усилению процессов разделения.

Полученные зависимости имеют высокую практическую ценность для проектирования и оптимизации вихревых аппаратов. Результаты позволяют определить граничный размер частиц, которые могут быть уловлены вихревой камерой заданных геометрических размеров. Определены условия, которые обеспечивают вынос капель нужного диаметра к оси аппарата для их последующего удаления, минимизируя при этом гидравлическое сопротивление при сохранении достаточной эффективности разделения фаз. Перспективным направлением для дальнейших исследований является изучение динамики изменения траектории капли в процессе её испарения.

Работа выполнена за счёт гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан, образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (соглашение № 10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

Литература

22. Sklabinskiy V., Pavlenko I., Skydanenko M., Włodarczak S., Krupińska A., Ochowiak M., Kruszelnicka I. Improvement of Mass Transfer Characteristics for the Gas-Liquid System in a

Vortex Counterflow Apparatus // *Energies*, 2025. Vol. 18. Article 984. DOI: 10.3390/en18040984

23. Ding H. An innovative model for cleaner energy separations in a vortex tube-based system // *Journal of Cleaner Production*, 2026. Vol. 553. Article 147974. DOI: 10.1016/j.jclepro.2026.147974.
24. Москалев Л.Н., Алексеев В.В., Лаптева Т.В. Исследование сопротивления зоны закручивания пылегазовой смеси в вихревом аппарате // *Бутлеровские сообщения*, 2023. Т. 76. № 10. С. 135–141. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/23-76-10-135
25. Mukherjee S., Siddiqi H., Maiti P., Parmar P., Meikap B.C. A comprehensive analysis of removal of hazardous dust particulates from chemical and process industries off gases by advanced wet scrubbing techniques – A review // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2024. Vol. 91. Article 105406. DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105406
26. Wang A., Song Q., Yao Q. Study on inertial capture of particles by a droplet in a wide Reynolds number range // *Journal of Aerosol Science*, 2016. Vol. 93. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2015.11.010
27. Голубева С.И., Хорзова Л.И. Обобщение режимных условий работы каплеуловителей интенсивных аппаратов мокрой газоочистки // *Инженерный вестник Дона*, 2021. № 3(75). С. 419–427.
28. Макаров В.Н., Угольников А.В., Макаров Н.В., Арсланов А.А. Математическая модель циркуляционного движения капли жидкости в газовой среде // *Недропользование*, 2021. Т. 21. № 4. С. 188–192. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.4.7
29. Шарапов Р.Р., Бойчук И.П., Савичев А.О. Решение задачи о закрученном течении жидкости в кольцевом канале // *Морские интеллектуальные технологии*, 2023. № 2–1(60). С. 367–371. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.046
30. Jugănar D.-E., Panaitescu M.I., Stan L.C. Comparative CFD based parametric analysis of gas flow in two counter-flow wet scrubber systems // *Journal of Marine Technology and Environment*, 2021. Vol. 1. P. 28–32. DOI: 10.53464/JMTE.01.2021.04
31. Тулубаев Р.Р., Шваб А.В. Моделирование аэродинамики газа и траектории движения частиц при взаимодействии двух встречных закрученных потоков // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 2022. № 75. С. 138–149. DOI: 10.17223/19988621/75/12
32. Wrzesińska B., Witman S. Wet dust removal in a scrubber with the colliding streams // *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2009. Vol. 11. P. 889–898.
33. Zinurov V., Kharkov V., Pankratov E., Dmitriev A. Numerical Study of Vortex Flow in a Classifier with Coaxial Tubes // *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 2022. Vol. 12. № 4. P. 336–346. DOI: 10.46604/ijeti.2022.9568
34. Levitsky I. Study of the vortex chamber and its application for the development of novel measurement and control devices // *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 2023. Vol. 40. № 3. P. 351–362. DOI: 10.1515/tjj-2021-0011
35. Ali H., Plaza F., Mann A. Flow visualization and modelling of scrubbing liquid flow patterns inside a centrifugal wet scrubber for improved design // *Chemical Engineering Science*, 2017. Vol. 173. P. 98–109. DOI: 10.1016/j.ces.2017.06.047
36. Силицын Н.Н., Заплатина Н.В., Сарычева И.А., Грибова Ю.В., Голицына Е.В., Донцова Ю.В. Математическое моделирование высокотемпературной сушки капли окалинмасло-содержащего шлама при её движении в закрученном потоке газа // *Вестник кибернетики*, 2023. Т. 22. № 3. С. 66–75. DOI: 10.35266/1999-7604-2023-3-66-75
37. Tomaszewski A., Przybyliński T., Lackowski M. Experimental and numerical investigation of spray scrubber dust collection efficiency // *Applied Sciences*, 2024. Vol. 14. № 23. Article 11240. DOI: 10.3390/app142311240
38. Колодежнов В.Н. Плоское вихревое течение в цилиндрическом слое // *Вычислительная механика сплошных сред*, 2021. Т. 14. № 2. С. 159–170. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.2.13
39. Chianese C., Dal Pozzo A., Cozzani V. Assessing wet scrubbing as final additional stage for dry waste-to-energy flue gas treatment lines // *Chemical Engineering Transactions*, 2024. Vol. 111. P. 571–576. DOI: 10.3303/CET24111096
40. Харьков В.В., Николаев А.Н. Разработка и исследование аппарата вихревого типа для концентрирования фруктовых соков // *Вестник Казанского технологического университета*, 2014. Т. 17. № 14. С. 445–448.
41. Харьков В.В., Николаев А.Н. Инженерная методика расчёта вихревой камеры со взвешенным капельным слоем // *Химическая промышленность сегодня*, 2017. № 1. С. 16–21.
42. Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., Харьков В.В. Пат. 212644 Российская Федерация, МПК B05B 1/26, СПК B05B 1/26. Разбрызгивающее устройство, опубл. 02.08.2022, Бюл. № 22.

References

1. Sklabinskyi V., Pavlenko I., Skydanenko M., Włodarczak S., Krupińska A., Ochowiak M., Kruszelnicka I. Improvement of Mass Transfer Characteristics for the Gas-Liquid System in a Vortex Counterflow Apparatus // *Energies*, 2025. Vol. 18. Article 984. DOI: 10.3390/en18040984
2. Ding H. An innovative model for cleaner energy separations in a vortex tube-based system // *Journal of Cleaner Production*, 2026. Vol. 553. Article 147974. DOI: 10.1016/j.jclepro.2026.147974.
3. Moskalev L.N., Alekseyev V.V., Lapteva T.V. Investigation of the resistance of the swirling zone of a dust and gas mixture in a vortex apparatus // *Butlerovskie soobshcheniya*, 2023. Vol. 76. № 10. P. 135–141. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/23-76-10-135
4. Mukherjee S., Siddiqi H., Maiti P., Parmar P., Meikap B.C. A comprehensive analysis of removal of hazardous dust particulates from chemical and process industries off gases by advanced wet scrubbing techniques – A review // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2024. Vol. 91. Article 105406. DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105406
5. Wang A., Song Q., Yao Q. Study on inertial capture of particles by a droplet in a wide Reynolds number range // *Journal of Aerosol Science*, 2016. Vol. 93. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2015.11.010
6. Golubeva S.I., Khorzova L.I. Generalization of operating conditions of droplet traps of intensive wet gas purification devices // *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2021. № 3(75). P. 419–427.
7. Makarov V.N., Ugol'nikov A.V., Makarov N.V., Arslanov A.A. Mathematical model of the circulation movement of liquid droplets in a gaseous medium // *Nedropol'zovaniye*, 2021. Vol. 21. № 4. P. 188–192. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.4.7
8. Sharapov R.R., Boychuk I.P., Savichev A.O. Solving the problem of swirling fluid flow in an annular channel // *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii*, 2023. № 2–1(60). P. 367–371. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.046
9. Jugănar D.-E., Panaitescu M.I., Stan L.C. Comparative CFD based parametric analysis of gas flow in two counter-flow wet scrubber systems // *Journal of Marine Technology and Environment*, 2021. Vol. 1. P. 28–32. DOI: 10.53464/JMTE.01.2021.04
10. Turubayev R.R., Shvab A.V. Modeling of gas aerodynamics and particle trajectories during the interaction of two oncoming swirling streams // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2022. № 75. P. 138–149. DOI: 10.17223/19988621/75/12
11. Wrzesińska B., Witman S. Wet dust removal in a scrubber with the colliding streams // *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2009. Vol. 11. P. 889–898.
12. Zinurov V., Kharkov V., Pankratov E., Dmitriev A. Numerical Study of Vortex Flow in a Classifier with Coaxial Tubes // *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 2022. Vol. 12. № 4. P. 336–346. DOI: 10.46604/ijeti.2022.9568

13. Levitsky I. Study of the vortex chamber and its application for the development of novel measurement and control devices // *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 2023. Vol. 40. № 3. P. 351–362. DOI: 10.1515/tjj-2021-0011
14. Ali H., Plaza F., Mann A. Flow visualization and modelling of scrubbing liquid flow patterns inside a centrifugal wet scrubber for improved design // *Chemical Engineering Science*, 2017. Vol. 173. P. 98–109. DOI: 10.1016/j.ces.2017.06.047
15. Sinitsyn N.N., Zapatrina N.V., Sarycheva I.A. Gribkova Yu.V., Golitsyna Ye.V., Dontsova Yu.V. Mathematical modeling of high-temperature drying of a drop of tin-oil-containing sludge during its movement in a swirling gas stream // *Vestnik kibernetiki*, 2023. Vol. 22. № 3. P. 66–75. DOI: 10.35266/1999-7604-2023-3-66-75
16. Tomaszewski A., Przybyliński T., Lackowski M. Experimental and numerical investigation of spray scrubber dust collection efficiency // *Applied Sciences*, 2024. Vol. 14. № 23. Article 11240. DOI: 10.3390/app142311240
17. Kolodezhnov V.N. Plane vortex flow in a cylindrical layer // *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, 2021. Vol. 14. № 2. P. 159–170. DOI: 10.7242/1999-6691/2021.14.2.13
18. Chianese C., Dal Pozzo A., Cozzani V. Assessing wet scrubbing as final additional stage for dry waste-to-energy flue gas treatment lines // *Chemical Engineering Transactions*, 2024. Vol. 111. P. 571–576. DOI: 10.3303/CET24111096
19. Khar'kov V.V., Nikolayev A.N. Development and the study of a vortex-type apparatus for concentrating fruit juices // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014. Vol. 17. № 14. P. 445–448.
20. Khar'kov V.V., Nikolayev A.N. Engineering methodology for calculating a vortex chamber with a suspended droplet layer // *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*, 2017. № 1. P. 16–21.
21. Dmitrieva O.S., Madyshev I.N., Khar'kov V.V. Pat. 212644 RU. Sprinkler device, publ. 02.08.2022, Bul. № 22.