

В последнее время на ряде объектов промышленной энергетики наметилась тенденция отхода от дорогостоящих видов топлива (газ, мазут) и перехода на традиционные для энергетики и более дешевые твердые виды топлива: уголь, сланец, торф. Такой переход ведет к снижению производственных издержек, но связан с реконструкцией топочных устройств и систем очистки дымовых газов [1]. При сжигании твердых топлив из топок котлов вместе с дымовыми газами, частицами золы и несгоревшего топлива выносятся большое количество оксидов серы [2]. Так например, современная ТЭС мощностью 2,4 млн. кВт расходует до 20 тыс. т. угля в сутки и выбрасывает в атмосферу 680 т. SO_2 и SO_3 при содержании серы в топливе всего 1,7% и 120-240 т. золы и пыли. Исследования показали [3], что вблизи мощной электростанции, выбрасывающей в сутки 280÷360 т. оксидов серы, их максимальная концентрация с подветренной стороны даже на расстоянии 1÷2 км составляет 0,22÷2,8 мг/куб.м. В этих условиях проблема очистки больших объемов газов от двуокиси серы становится все более актуальной. Высокая степень очистки газов от оксидов серы может быть достигнута в процессе их десульфурации щелочными растворами, например, раствором карбоната натрия. Указанный процесс удобно проводить в полых распыливающих реакторах [4], конструкция которых и принцип действия аналогичны распылительным сушилкам. Распыление жидкости в реакторе целесообразно осуществлять ротационными механическими распылителями с дисковыми рабочими элементами с непосредственной подачей жидкости и соударением (пересечением) двух факелов [5]. Промышленные варианты таких дисков рекомендованы фирмой «Ниро-Атомайзер» и позволяют получить тонкий и широкий распыл жидкостей. Отличительной особенностью дисковых распылителей является возможность их работы с загрязненными жидкостями, простота регулирования геометрии факела, плотности орошения и дисперсного состава капель путем изменения скорости вращения диска, перераспределения расхода жидкости по соударяющимся факелам. Распылительные реакторы обладают малым гидравлическим сопротивлением, реакционный процесс характеризуется простотой и низкой стоимостью. Обычно реактор работает в режиме полного испарения (по сухому циклу), что с одной стороны снимает вопрос об утилизации шламовых вод, а с другой позволяет использовать его даже на стадии подготовки и кондиционирования дымовых газов перед системами сухого пылезолоулавливания. Сухой сульфат/сульфит натрия, удаляемый из реактора и системы пылеочистки, может быть регенерирован в карбонат натрия для повторного использования в реакторе. Если распылительный реактор используется на стадии предварительной подготовки газа к пылезолоулавливанию, то процесс десульфурации будет сопровождаться еще целым рядом процессов, которые обычно называют кондиционированием газов. Это процессы охлаждения высокотемпературных дымовых газов за счет испарения раствора, их увлажнение и частичная пылеочистка за счет

конденсационного эффекта, инерционной сепарации и агрегирования частиц на каплях раствора. Очевидно, что эффективность вышеназванных процессов различна и существенным образом зависит от степени распыла раствора в реакторе. Известно, что в распылительных сушилках при мелкодисперсном распылении жидкости ($\delta=1\div 50$ мкм.) происходит практически мгновенное испарение жидкой фазы [6]. При этом время жизни капли ничтожно мало, а, следовательно, мала эффективность сорбционного процесса. С другой стороны, в полых распылительных скрубберах, где $\delta=100\div 500$ мкм., даже при обработке высокотемпературных газов ($t>1000^\circ\text{C}$) полного испарения жидкости не происходит [7]. В данной работе предлагается способ оценки максимального диаметра исходных капель жидкости при работе реактора в режиме полного испарения. Рассматривался одномерный случай движения капли вдоль продольной оси реактора. Предполагалось, что диаметр капель раствора в реакторе должен составлять $25\div 300$ мкм., а скорость их относительного движения не превосходит 5 м/с. Тогда предельное значение числа Рейнольдса для капли не превышает 300. В работе [8] показано, что при числах Re относительного движения меньших 1000 перенос массы в капле происходит преимущественно за счет диффузии, циркуляционные потоки в капле отсутствуют и последнюю можно рассматривать как недеформируемую сферическую частицу. При этом время релаксации капли невелико и значительно меньше времени пребывания ее в реакторе. Поэтому процесс движения капли считался квазистационарным. Из равенства сил тяжести и аэродинамического сопротивления, действующих на каплю, вытекает зависимость для скорости свободного осаждения капли (1) где ρ_r, ρ - плотности капли и газа; s_x коэффициент лобового сопротивления капли; g ускорение свободного падения; δ - текущий диаметр капли. Процесс испарения капель в полых вихревых аппаратах в общем случае можно представить состоящим из двух стадий. На первой стадии происходят одновременно как испарение капель, так и изменение их температуры. Если средняя температура жидкости в капле меньше температуры мокрого термометра, то поток тепла, поступающий от окружающего высокотемпературного газа, частично затрачивается на испарение, а частично - на нагрев жидкости в капле. В том случае, если температура капли превышает температуру мокрого термометра, избыточное тепло, которым обладает капля, затрачивается на испарение, а жидкость в капле охлаждается. В любом случае изменение температуры капли продолжается до тех пор, пока она не станет равной температуре мокрого термометра во всем объеме капли. После этого начинается вторая стадия, когда все тепло, подводимое к капле от газа, тратится исключительно на испарение жидкости. В тех случаях, когда начальная температура капель незначительно отличается от температуры мокрого термометра или когда температура газа превышает $350\text{-}400^\circ\text{C}$, изменением температуры капель можно пренебречь и

считать, что все тепло, подводимое к каплям, тратится на испарение жидкости [9]. В рамках данного исследования считалось, что все тепло, передаваемое высокотемпературным газом капле за счет конвекции, расходуется на испарение жидкости, а тепловой поток к поверхности капель, связанный с излучением газа и водяного пара, пренебрежимо мал. Из уравнения теплового баланса было получено уравнение, определяющее уменьшение диаметра испаряющейся капли во времени (2) где α коэффициент теплоотдачи к капле; t_p , t - температуры газа и капли; r - удельная теплота парообразования; τ - время движения капли. Дифференциальное уравнение (2) дополнялось начальными условиями вида (3) где δ_0 - исходный диаметр капли. Зависимости (1)-(3) полностью определяли постановку задачи о движении испаряющейся капли в реакторе. При задании значений кинематических коэффициентов и с целью получения аналитических решений, для максимального диаметра капель рассмотрено два частных случая. 1. Безынерционное, вязкое движение капли ($Re \ll 1$). В этом случае сопротивление капли подчиняется закону Стокса, а тепловой поток к капле лимитирован теплопроводностью газа, (4) где Re = - число Рейнольдса капли, λ , ν - коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости газа. Интегрированием уравнения (2) при начальных условиях (3) с учетом (4) был определен характер изменения диаметра испаряющейся капли (5) и записано условие полного испарения капли на выходе распылительного реактора $\tau = \tau_0$; $\delta = 0$; $\delta_0 = \delta_{max}$, откуда с учетом (5) была получена зависимость для максимально возможного диаметра капли, (6) где τ_0 - время пребывания капли в реакторе. Определение времени пребывания капли в реакторе проводилось, исходя из величины пути, пройденного каплей, (7) и скорости движения капли (1). (8) Окончательно, для времени полета капли в реакторе и размера капли, полностью испаряющейся за это время, были получены следующие зависимости, отражающие их связь с теплофизическими и геометрическими параметрами процесса: (9) (10) Следует отметить, что аналогичная зависимость для предельного диаметра капли, отвечающего условию полного испарения, была получена в [10], где исследовался процесс осаждения пыли диспергированной водой. 2. Инерционное обтекание капли ($1 \leq Re \leq 300$). Данному диапазону чисел Рейнольдса соответствует переходная область на кривой Релея гидравлического сопротивления сферической частицы [10]. Коэффициент сопротивления тел в этой области зависит от множества факторов: формы тела, состояния вещества, шероховатости поверхности, сопутствующих процессов нагрева, испарения, коалесценции, ускорения и т.д. Важно, что зависимость коэффициента сопротивления от числа Re в этой области может быть и обычно представляется в виде степенной зависимости, (11) коэффициенты которой определяются по условию наилучшей аппроксимации экспериментальных данных. Далее этот факт был использован с целью упрощения решения. При этом, безусловно, учитывалось, что

сопротивление сферы в переходном режиме изменяется от закона Стокса для чисто вязкого обтекания частицы до закона Ньютона, справедливого в автомоделном режиме, т.е. величина показателя степени n должна принадлежать интервалу $[-1;0]$. Аналогичная зависимость была использована для расчета коэффициента теплоотдачи на поверхности капли (12) Обзор экспериментальных данных по тепло- и массоотдаче при испарении капли в потоке газа, выполненный авторами [13], а также многочисленные данные по теплоотдаче в дисперсных системах, приведенные в монографии [11], подтверждают возможность использования зависимости (12) при аппроксимации экспериментальных данных. При этом показатель степени m обычно изменяется в диапазоне от 0,5 (по данным Фресслинга) до 0,67 (по данным Соколовского и Тимофеевой) [13]. Следует особо подчеркнуть, что оба значения получены при обработке опытных данных по испарению капель воды в воздухе. Зависимости для коэффициентов переноса (11), (12) были использованы для определения относительной скорости движения капли, (13) величины изменения размера капли в процессе ее движения и испарения, (14) и записи условия работы распылительного реактора в режиме полного испарения, где Интегральное уравнение (7) для случая инерционного движения капли принимает вид, (16) где Нетрудно видеть, что при целочисленных значениях показателя степени k ($k=1,2,3\dots$) уравнение (16) допускает аналитическое решение относительно времени жизни капли в распылительном реакторе. Были рассмотрены два случая: $k=1$ и $k=2$. Их реализация привела к дополнительным ограничениям на показатели степени m и n в уравнениях для коэффициентов переноса $k=1$, $m+n=1$, (17) $k=2$, $6m+5n=7$ В случае $k=1$ целесообразно считать $m=0,6$, $n=0,4$. Тогда в качестве зависимости (12) можно использовать известную формулу Мак-Адамса [11] (18) полученную им в результате обобщения большого числа экспериментальных данных по теплообмену в дисперсных потоках и справедливую в широком диапазоне чисел Рейнольдса ($Re=17\div 70000$). Аппроксимация кривой Релея зависимостью вида (19) выполненная в рамках данного исследования, показала приемлемость данной зависимости при $b=6,3$ для описания опытных данных по гидравлическому сопротивлению сферы в диапазоне $Re=10\div 300$. В случае $k=2$ показатели степени m и n принимались равными 0,67 и 0,6 соответственно. Тем самым были реализованы возможности известных зависимостей Клячко [11] и Стьюарта-Лайтфута [10] (20) При задании коэффициентов переноса формулами (20) искомые зависимости для времени пребывания капли в реакторе и предельно допустимого диаметра капли имели следующий окончательный вид, (21) (22) Знание максимального размера капель жидкости, следующего из условия работы распылительного реактора в режиме полного испарения, позволяет целенаправленно изменять параметры ротационных дисковых распылителей с целью достижения требуемого эффекта «сухого» распыления. Связь максимального диаметра с параметрами дисковых

распылителей может быть установлена на основании формулы Фридмана, Глуккерта, Маршалла [6] где R , S , N - радиус, смоченный периметр и скорость вращения диска распылителя; L - массовый расход жидкости; σ - коэффициент поверхностного натяжения. Из формулы следует, что укрупнение диаметра капель с $1 \div 50$ мкм. в распылительных сушилках до $25 \div 250$ мкм. в распылительном реакторе может быть достигнуто даже путем уменьшения скорости вращения диска распылителя. При этом, чтобы спектр капель не оказался двумодальным, желательно использовать распылители с соударением факелов.