

Э. Г. БРАТУГА, канд. техн. наук, А. Ю. ИВАНОВСКИЙ, канд. техн. наук

## ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ФАКЕЛОВ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ НА КОЭФФИЦИЕНТ УНОСА КАПЕЛЬНОЙ ВЛАГИ

Одним из основных аппаратов кондиционирования технологических газов в энергетических и металлургических производствах являются полые безнасадочные скрубберы мокрой очистки. Наряду с высокими технико-экономическими показателями указанные аппараты отличаются повышенным брызгоуносом, что приводит к необходимости постановки надежных сепарационных устройств.

При проектировании сепаратора с достаточной степенью достоверности необходимо установить расход капельной среды, выносимой из активного объема скруббера. В общем комплексе задач, возникающих при исследовании процесса уноса, наименее изученным и практически не получившим количественной оценки является вопрос о взаимном влиянии факелов распылителей на коэффициент уноса  $\delta = M_y/M_0$ , где  $M_y$  — расход жидкости, выносимой на сепаратор;  $M_0$  — общий расход жидкости, продуцируемой форсунками.

В связи с крайней сложностью процессов взаимодействия капельных потоков, сопровождающихся вторичным дроблением и коагуляцией в условиях неравномерного поля скоростей газа, основным является экспериментальный метод исследования.

Опытная установка представляет собой аэродинамическую трубу с вертикальным рабочим участком, внутри которого располагались центробежные форсунки типа УЦ с диаметром соплового канала 6 мм, обеспечивающие хорошую равномерность распределения локальных расходов по окружности факела. Уровень неравномерности поля скоростей воздушного потока в зоне измерений составлял не более 5% при изменении средней скорости от 1,5 до 4,5 м/с. Для исследования влияния стартовой скорости капель на величину уноса перепад давления на форсунке  $\Delta P$  изменялся от 0,15 до 0,3 МПа.

В том сечении вертикальной рабочей части установки, где с ней сопрягается поворотный элемент канала, через который воздух удаляется из помещения, по всему периметру квадратного сечения канала имеется короб, предназначенный для сбора и дренирования той части влаги, которая, будучи унесенной из контрольного объема, могла бы стекать в мерный бак, что приводило бы к снижению действительного коэффициента уноса.

При отключенном вентиляторе и работающей группе форсунок (либо одиночной форсунке) с помощью мерного бака измеряется полный расход жидкости  $M_0$ . При определенной скорости воздушного потока, когда имеет место унос капельной среды,

определяется расход жидкости  $M_1$ , равный разности между известным расходом  $M_0$  и количеством жидкости, вынесенной из аппарата  $M_y$ .

Перед проведением эксперимента были выполнены тарировочные опыты, связанные с определением функции распределения объема капель по размерам  $v(D)$  и расходных характеристик распылителей. Указанные результаты представлены на рис. 1.

На первом этапе исследовали процесс уноса капельной влаги при работе одиночного распылителя, размещаемого в различных ярусах рабочей части установки от  $z = 0$  до  $z = 0,84$  м (рис. 2).

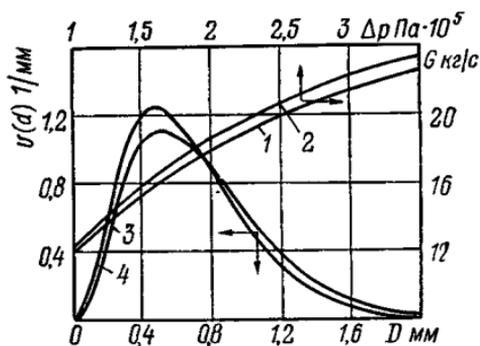


Рис. 1. Расходные (1, 2) и дисперсные (3, 4) характеристики форсунок: 1 — форсунка 1; 2 — форсунка 2; 3 —  $\Delta P = 1,5 \cdot 10^5$  Па; 4 —  $\Delta P = 3 \cdot 10^5$  Па.

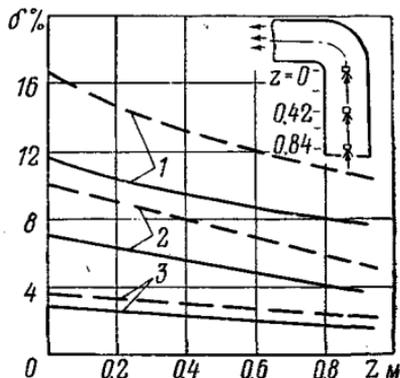


Рис. 2. Коэффициент уноса одиночных форсунок:

— — —  $1,5 \cdot 10^5$  Па; — — —  $3 \cdot 10^5$  Па 1 —  $C_T = 4,5$ ; 2 —  $C_T = 2,25$ ; 3 —  $C_T = 1,15$  м/с.

Как и следовало ожидать, коэффициент уноса увеличивается с повышением скорости газового потока, т. е. по мере возрастания разности скоростей несущей среды и скорости витания капель. Сравнение кривых уноса, полученных при различных перепадах давления жидкости на форсунках, обнаруживает, что при прочих равных условиях уменьшение перепада  $\Delta P$  (т. е. стартовой скорости капель) приводит к интенсификации уноса. Дисперсный состав капель при снижении  $\Delta P$  от 0,3 до 0,15 МПа (см. рис. 1) практически не изменяется. Следовательно, при падении стартовой скорости на более коротком отрезке траектории капли приобретает скорость, равную скорости витания, и уносится потоком, не успев достигнуть поверхности канала.

Помимо этого, из рис. 2 видно, что по мере перемещения распылителя от сечения  $z = 0$  вниз по каналу имеет место заметное уменьшение коэффициента уноса  $\delta$ . Этот результат полностью согласуется с данными, экспериментально установленными при исследовании брызгоуноса в работе [1], однако объяснение физических основ указанного эффекта практически отсутствует.

Если весь спектр капель разбить на ряд конечных разрядов, в каждом из которых некий размер  $D_i$  является представительным, то очевидно, что для каждого размера  $D_i$  можно построить траекторию движения капли. При этом чем меньше  $D_i$ , тем круче траектория капли разворачивается от первоначальной и сопрягается с траекторией движения газа. Однако этим можно объяснить лишь повышенный унос в сечении  $z = 0$ , где большее число траекторий не пересекается с поверхностью стенок, ограничивающих канал.

В то же время, начиная уже с яруса  $z = 0,21$  м и ниже, условия взаимодействия капель или их траекторий с поверхностью стенок оказываются одинаковыми и полученный эффект с этих позиций не может найти объяснения. Анализ режимных параметров в натурном скруббере и в нашей модели показывает, что даже при скорости газа 1,1 м/с в канале имеет место развитый турбулентный режим течения при числах Рейнольдса от  $10^5$  до  $0,25 \cdot 10^6$  соответственно. Известно, что при таком уровне турбулизации потока возникают интенсивные пульсационные составляющие скорости газа, определяющие процесс турбулентной диффузии.

В соответствии с аналогией Смолуховского [2] убыль концентрации капель за счет слияний, вызванных турбулентными пульсациями, может быть представлена уравнением вида

$$dn_i/d\tau = -D_i n_i^2, \quad (1)$$

где  $\tau$  — время;  $D$  — константа коагуляции для  $i$ -го размера капль;  $n_i$  — счетная концентрация капель в единице объема.

Решение уравнения (1) имеет вид

$$n_{\tau i} = n_{0i} / (1 + D_i n_{0i} \Delta\tau). \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что эффект уменьшения уноса по мере заглубления распылителя в канале может быть объясним процессом турбулентной коагуляции капель. Действительно, по мере заглубления форсунки для всех капель, не выпавших на стенки канала, увеличивается время пребывания  $\tau$ , в течение которого происходит их взаимодействие, обусловленное турбулентными пульсациями. Другими словами, интенсифицируется процесс коагуляции с образованием капель, скорость витания которых оказывается больше скорости потока газа, в результате чего они сепарируются.

Вместе с тем известно [3], что турбулентными пульсациями могут увлекаться лишь капли, имеющие размер не более 10 мкм, что, как видно из рис. 1, составляет малую долю в общем количестве капель.

Расчет скорости витания капель при различных скоростях газа показал, что при изменении скорости газа от 1,5 до 4,5 м/с все капли, размеры которых меньше некоторого порогового уров-

ня  $D_{\Pi} = 0,335$  и  $1,1$  мм соответственно, в принципе могут быть унесены газовым потоком. При этом доля этих капель

$$\delta' = \frac{\pi}{6} \int_0^{D_{\Pi}} D^3 v(D) dD, \quad (3)$$

как показывает расчет, в указанном диапазоне скоростей газа составляет от 14,4 до 82% соответственно.

Из рис. 1 видно, что спектр потенциально уносимых капель является существенно полидисперсным, в связи с чем в пространстве над распылителем имеют место различные скорости капель, что, как известно [4], может приводить к ортокинетической коагуляции. При этом также очевиден факт усиления общего эффекта коагуляции указанного типа по мере увеличения пути капли над зоной диспергирования. В отличие от турбулентной ортокинетической коагуляции охватывает практически весь спектр капель, что и определяет ее основную значимость в рассматриваемом процессе.

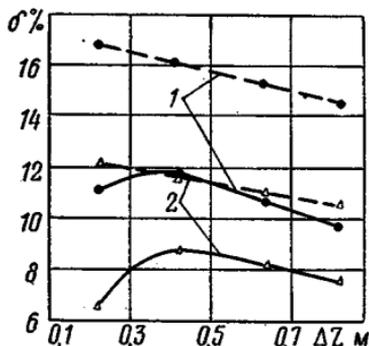


Рис. 3. Влияние расстояния между форсунками на коэффициент уноса  $\delta$ : — — — — — приведенный коэффициент; — — — — — для двух форсунок в разных ярусах; 1 —  $\Delta P = 1,5 \cdot 10^6$ ; 2 —  $\Delta P = 3,0 \cdot 10^6$  Па.

Как известно, оросительная система скруббера формируется в многоярусном варианте, т. е. процессы, рассмотренные в предыдущем простейшем случае, осложняются взаимным влиянием факелов распылителей, расположенных на различных

ярусах. В связи с этим проанализируем результаты, полученные при взаимодействии двух идентичных распылителей, установленных на различном расстоянии друг от друга вдоль оси  $z$  (рис. 3). Опыты проводились при фиксированном положении форсунки 1 в ярусе  $z = 0$  и перемещаемой второй форсунки в ярусы  $z = 0,21; 0,41; 0,62, 0,82$ , перепады давления воды на распылителях  $\Delta P = 0,15$  составляли 0,15 и 0,3 МПа, скорость газа равнялась 4,5 м/с.

Сплошные линии соответствуют так называемому действительному значению коэффициента уноса  $\delta$ , который для случая работы двух распылителей определялся как

$$\delta = M_y / (M_1 + M_2), \quad (4)$$

где  $M_y$  — суммарный действительный расход жидкости, вынесенный из аппарата;  $M_1, M_2$  — производительность первого и второго распылителей (см. рис. 1). Для выяснения эффекта взаи-

модельства факелов распылителей здесь же пунктирными кривыми нанесены зависимости так называемого приведенного коэффициента уноса  $\delta_n$ , который определялся как

$$\delta_n = \delta_1 M_1 + \delta_2 M_2 / (M_1 + M_2), \quad (5)$$

где  $\delta_1$  — действительный коэффициент уноса распылителей 1 при неработающем распылителе 2;  $\delta_2$  — действительный коэффициент уноса распылителя 2 при неработающем распылителе 1. Значения  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  получены при том же расположении распылителей, что и в условиях их совместной работы.

Очевидно, что в случае отсутствия взаимодействия факелов распылителей кривые действительных коэффициентов уноса должны были совпасть с кривыми приведенных их значений. Однако из рисунка видно, что значения  $\delta$  при всех скоростях газа остаются заметно ниже значений коэффициента уноса  $\delta_n$ . Так, при скорости газа 4,5 м/с  $\Delta\delta = \delta_n - \delta$  составляет более 3%, что является однозначным подтверждением наличия указанного эффекта взаимодействия, проявляющегося в уменьшении доли полного расхода жидкости, уносимой из пространства аппарата.

Однако тот факт, что величина  $\Delta\delta$  остается постоянной при изменении  $\Delta z$  от 0,84 до 0,42, оказывается малообъяснимым. Во-первых, уменьшение  $\Delta z$  должно приводить к увеличению общего числа взаимодействующих капель в единице объема, во-вторых, к интенсификации искривления линий тока газа по направлению к стенкам модели аппарата, где порозность капель существенно отличается от таковой в ядре потока. Последнее должно способствовать дополнительному «сбросу» некоторых фракций капель на стенку.

Очевидно, что «захват» каплями факела форсунки, расположенной в сечении  $z = 0$ , капель, выносимых из факела форсунки, находящейся ниже, будет при прочих равных условиях тем более эффективным, чем с меньшей скоростью капли с нижнего яруса будут проходить через верхний факел. По мере снижения величины  $\Delta z$  уменьшается путь разгона капель газом, т. е. скорость, с которой капли нижнего яруса приходят к верхнему факелу.

Таким образом, перечисленные самостоятельные факторы приводят к выводу о том, что с уменьшением расстояния между форсунками снижается унос капель, обусловленный интенсификацией коагуляции. С приближением форсунок 1 и 2 уменьшается высота сепарационного пространства над факелом последней, что должно приводить к увеличению уноса.

Для более детального исследования обнаруженного влияния расстояния между форсунками на величину коэффициента уноса при фиксированном положении форсунки 1 в ярусе  $z = 0$  форсунку 2 размещали в ярусе  $z = 0,21$  и опыты проводили по той же методике.

Из рис. 3 видно, что при  $\Delta z < 0,42$  величина  $\Delta\delta$  резко возрастает, а действительный коэффициент уноса интенсивно падает,

что свидетельствует о превалирующем влиянии перечисленных выше факторов, связанных с усилением коагуляции при уменьшении расстояния между распылителями.

Таким образом, уже эти первые исследования основных интегральных факторов, определяющих эффекты взаимодействия распылителей, позволяют сформулировать некоторые практические рекомендации относительно формирования оросительной сети безнасадочных скрубберов.

Совершенно очевидно, что меры, направленные на повышение эффективности охлаждения и очистки газов, всегда будут находиться в противоречии с мерами, обеспечивающими уменьшение брызгоуноса за счет внутренних процессов взаимодействия факелов. В связи с этим деформация оросительной сети, направленная на снижение уноса капельной влаги, не должна приводить к ослаблению основной функции аппарата.

Полученные в настоящей работе зависимости дают возможность применительно к решению конструктивных задач выделить следующие основные результаты. При фиксированном верхнем распылителе в широком диапазоне расстояний между форсунками сохраняется одинаковая интенсивность коагуляционных процессов, что подтверждается практической эквидистантностью кривых  $\delta(\Delta z)$ ,  $\delta_{\text{п}}(\Delta z)$  при  $\Delta z > 0,42$  м. Начиная с некоторого «порогового» значения при сближении форсунок наблюдается существенное усиление коагуляции и, как следствие этого, уменьшение действительных коэффициентов уноса. На основании данных факторов можно считать, что рациональной окажется схема, при которой в основной части аппарата сохраняется существующая структура размещения ярусов, а в верхней — сближаются два последних до уровня, обеспечивающего усиление коагуляции и снижение уноса до конкретного требуемого предела. При этом целесообразно, перемещая последний ярус вниз и предпоследний ярус вверх, сдвигать их навстречу друг другу до «порогового» расстояния.

В настоящее время без дополнительных расчетно-экспериментальных исследований невозможно точно указать величину «порогового» расстояния применительно к реально действующему скрубберу. Однако без опасения ухудшить основной процесс аппарата и вместе с тем с определенным основанием уменьшить брызгоунос можно рекомендовать при расстоянии между верхним и предпоследним ярусом порядка 5—6 м и диаметре скруббера 6 м переместить их навстречу друг другу так, чтобы расстояние между ними было не более трех метров. Эта конкретная рекомендация базируется на том, что в наших опытах «пороговое» расстояние составляло около половины эквивалентного диаметра аппарата.

Условия взаимодействия сред в натурном скруббере отличаются от аналогичных условий в модели в основном плотностью орошения. На основании полученных результатов можно пола-

гать, что все обнаруженные в модели явления лишь усилятся при увеличении плотности орошения, в связи с чем нет оснований предполагать неэффективность сделанных конструктивных рекомендаций.

Список литературы: 1. Рамм В. М. Абсорбция газов. — М.: Химия, 1976.— 557 с. 2. Смолуховский М. Коагуляция коллоидов. — М.: ОНТИ, 1936.—48 с. 3. Бабуха Г. Л., Шрайбер А. Л. Взаимодействие частиц полидисперсных материалов. — Киев: Наукова думка, 1972.—102 с. 4. Ужов В. Н., Вальберг А. Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. — М.: Химия, 1972.—37 с.