

Оптимизация конструкции струйно-барботажных контактных устройств массообменных аппаратов промышленных ТЭС*

Мадышев И. Н., инж., Николаев А. Н., доктор техн. наук

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Дмитриева О. С., канд. техн. наук, Дмитриев А. В., доктор техн. наук

Нижнекамский химико-технологический институт

Предложено струйно-барботажное контактное устройство для деаэрации воды промышленных тепловых электрических станций. Разработка новых контактных устройств позволяет увеличить эффективность тепломассообменных процессов, что в свою очередь способствует снижению эксплуатационных затрат на выработку электроэнергии. Разрабатываемые контактные устройства используют энергию жидкости, стекающей сверху вниз, что снижает гидравлическое сопротивление по паровой (газовой) фазе. Кроме того, за счет снижения сепарационного пространства уменьшаются габариты тепломассообменных аппаратов с установленными струйно-барботажными контактными устройствами. Представлены результаты изменения объемного расхода пара с учетом изменения характерных параметров контактного устройства.

Ключевые слова: барботаж, контактное устройство, массообмен, деаэрация, струя, лопатка.

На ТЭС в ряде технологических процессов значительную роль играют массообменные аппараты, применяемые для деаэрации питательной воды, охлаждения технической воды в системах оборотного водоснабжения, подогрева и деаэрирования основного конденсата в системах регенерации турбоустановок большой мощности [1]. От эффективности деаэрации воды зависят надежность и экономичность работы энергетического объекта. При этом надежность обусловлена интенсивностью процессов коррозии металла трубопроводов и оборудования, а экономичность связана с присутствием в водяном паре неконденсирующихся газов, затрудняющих теплообмен при конденсации [2 – 4].

Наиболее распространенные деаэраторы в промышленности — струйно-барботажные, струйные, пленочные. Из-за небольшой поверхности контакта фаз и невысокой пропускной способности насадочных элементов применение пленочных деаэраторов ограничено. Наилучший эффект деаэрации достигается в деаэраторах, сочетающих струйный, пленочный или капельный принцип распределения воды с барботажом [5].

Возможным решением проблемы повышения массообменной эффективности является применение на действующих ТЭС термических деаэраторов, в которых используется струйно-барботажное взаимодействие парового и жидкостного потоков. Однако известные

на сегодняшний день конструкции струйно-барботажных деаэраторов характеризуются значительными габаритами и высокой металлоемкостью, поскольку в данных аппаратах используются отсеки, предназначенные лишь для барботажного или струйного взаимодействия между паром и жидкостью. Кроме того, на барботажных тарелках наблюдается капельный унос жидкости, поэтому для эффективной работы барботажного отсека необходимо увеличивать высоту сепарационного пространства.

Указанные недостатки исключены в массообменном аппарате со струйно-барботажными контактными устройствами (рис. 1), разработанными авторами статьи. Контактное устройство представляет собой цилиндрический барабан 1, который приводится во вращение с помощью внешних радиальных лопаток 2 за счет кинетической энергии потоков жидкости и пара, движущихся в противоточном режиме. На внутренней поверхности по всей длине барабана размещены радиальные лопатки 3, которые разделены на отдельные секции с помощью поперечных перегородок. Радиальные отверстия, выполненные на боковой поверхности барабана, служат для прохода и отвода контактирующих фаз из внутренней полости контактного устройства.

С целью увеличения площади поверхности контакта фаз и образования свободно стекающих струй на конце радиальных лопаток предусмотрены треугольные риски. Для наиболее компактного расположения предлагаемых контактных устройств и исключения “мертвого” пространства тарелки контактных

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант МК-206.2012.8).

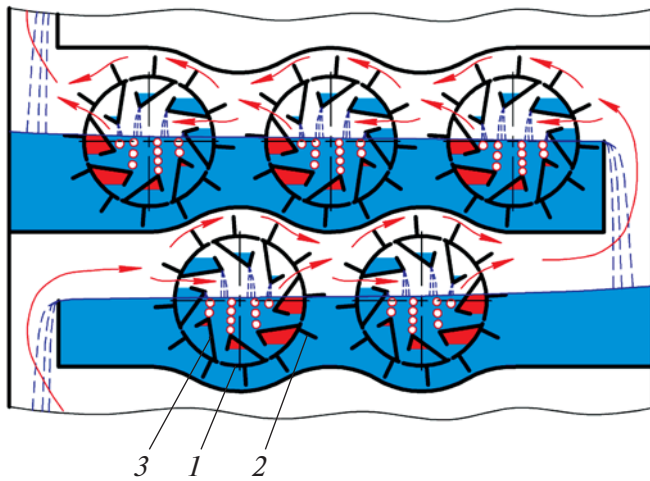


Рис. 1. Схема массообменного аппарата со струйно-барботажными контактными устройствами:

1 — цилиндрический барабан; 2 и 3 — внешние и внутренние лопатки

ступеней выполнены гофрированными. Вращаясь вместе с барабаном 1, внутренние радиальные лопатки 3 захватывают пар. При вращении барабана находящийся внутри лопаток пар погружается в слой жидкости, где происходит его частичное сжатие и барботаж вытесненного объема через слой жидкости в виде пузырьков. Когда объем пара становится равным нулю, лопатки 3 захватывают жидкость, которая при дальнейшем вращении барабана 1 стекает в виде струй на поверхность потока жидкости. Часть потока жидкости, не поступающая во внутреннюю полость барабана, смачивает гидрофильную поверхность внешних радиальных лопаток, которые взаимодействуют с соответствующим потоком пара. Следует отметить, что в переливных устройствах предлагаемого массообменного аппарата восходящий паровой поток контактирует с нисходящей струей жидкости, которая образуется с помощью сливной регулирующей планки, имеющей треугольные прорези. Данный способ организации контакта фаз позволяет существенно увеличить коэффициент массоотдачи и повысить эффективность массообменных процессов.

Ступени струйно-барботажных аппаратов формируются из контактных устройств одинакового размера, количество которых определяется производительностью аппарата. Такой подход к конструктивному оформлению исключает необходимость решения вопроса масштабного перехода и позволяет создавать аппараты любой заданной производительности без снижения эффективности.

В современной литературе представлены многочисленные исследования по взаимодей-

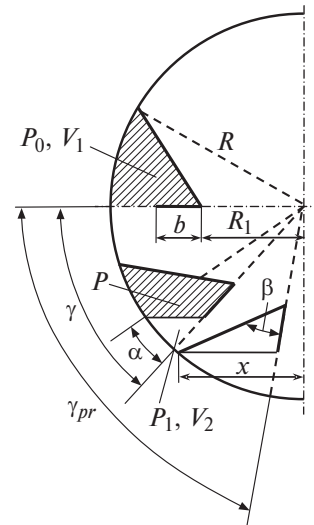


Рис. 2. Расчетная схема струйно-барботажного контактного устройства

ствием газа и жидкости [6–8], вместе с тем для разработанного струйно-барботажного контактного устройства необходим новый подход к созданию его оптимальных конструкций. Важным этапом проектирования этих устройств является определение оптимальных геометрических размеров для достижения максимальной эффективности процесса деаэрации. При работе струйно-барботажного контактного устройства наблюдается неравномерность расходов барботируемого пара и стекающей жидкости по сечению барабана, что приводит к снижению эффективности массообменных процессов. Поэтому целью проводимых численных исследований было определение таких геометрических параметров контактного устройства, которые позволяют интенсифицировать массообменные процессы за счет увеличения продолжительности контакта между паром и жидкостью.

Объем пара, захватываемого одной лопаткой, можно найти из выражения

$$V_1 = RH \left[\frac{\pi R}{n} - \frac{R_1}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{n} \right) \right], \quad (1)$$

где R — радиус барабана, м; H — длина барабана, м; R_1 — расстояние от оси барабана до угла лопатки, м; n — число лопаток.

Предельный угол поворота лопатки (рис. 2) можно рассчитать из выражения

$$\gamma_{pr} = \arctg \left(\frac{\sin \left(\frac{2\pi}{n} \right)}{\cos \left(\frac{2\pi}{n} \right) - \frac{b+R_1}{R}} \right), \quad (2)$$

где b — вылет лопатки, м.

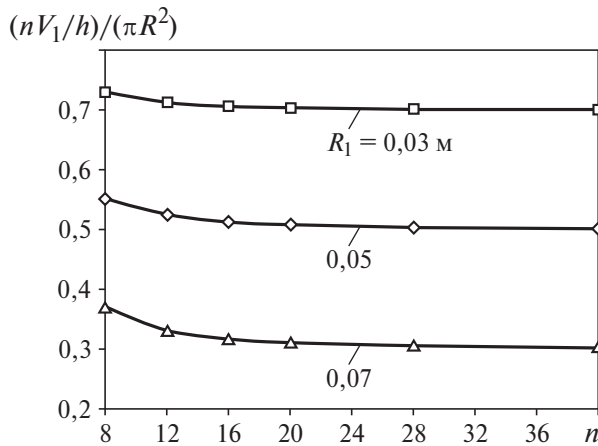


Рис. 3. Зависимости объема барботируемого пара от числа лопаток при $R = 0,1$ м, $b = 0,02$ м

Если угол поворота лопатки γ меньше предельного, т. е. $\gamma < \gamma_{pr}$, то вытесненный объем пара

$$V_2 = \frac{R^2 H}{2} \left(\alpha - \frac{R_1 + b}{R} \sin \alpha \right), \quad (3)$$

где

$$\alpha = \gamma - \arctg \left(\sqrt{\left(\frac{R}{x} \right)^2 - 1} \right); \quad x = \sqrt{R^2 - (R_1 + b)^2 \sin^2 \gamma}.$$

Если угол поворота лопатки $\gamma \geq \gamma_{pr}$, то вытесненный объем пара

$$V_2 = V_1 + \frac{b^2 H \sin \gamma \sin \beta}{2 \sin(\beta - \gamma)}, \quad (4)$$

где

$$\beta = \arctg \left(\frac{\sin \left(\frac{2\pi}{n} \right)}{\cos \left(\frac{2\pi}{n} \right) - \frac{R_1}{R}} \right).$$

Средний объемный расход барботируемого пара можно определить по формуле

$$G_{vcp} = \frac{n \omega V_1}{2}, \quad (5)$$

где ω — угловая частота вращения барабана, c^{-1} .

Текущий объемный расход барботируемого пара можно вычислить из выражения

$$G_v = n \omega \frac{dV_2}{d\gamma}. \quad (6)$$

Оценочные расчеты выполняли при различных геометрических параметрах разрабо-

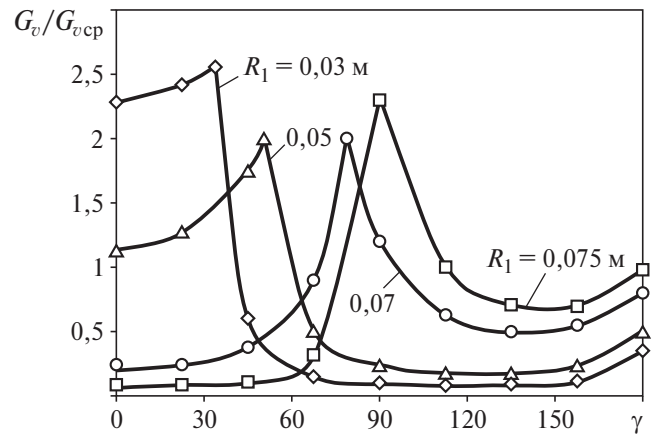


Рис. 4. Зависимости текущего объемного расхода барботируемого пара от угла поворота лопатки при $R = 0,1$ м, $b = 0,02$ м, $n = 20$

танного контактного устройства. Результаты показали, что наиболее целесообразна такая эксплуатация струйно-барботажного контактного устройства, при которой основная доля расхода барботируемого пара и стекающей жидкости приходится на центральную часть — вдоль вертикальной оси барабана, т. е. при $\gamma = 60 \div 120^\circ$. Это связано с тем, что в данной части контактного устройства время всплытия пузырей и стекания струй жидкости максимальное, а значит, выше эффективность массообменного процесса.

При исследовании различных геометрических параметров, таких, как расстояние от оси барабана до угла лопатки R_1 , вылет лопатки b и число лопаток n , были получены зависимости текущего объемного расхода барботируемого пара G_v от угла поворота лопатки γ . При построении графиков размерные физические величины были приведены к безразмерному виду с помощью среднего объемного расхода барботируемого пара $G_{v,cp}$ и площади поперечного сечения барабана πR^2 .

Зависимости объема барботируемого пара nV_1 от числа лопаток n при различном расстоянии от оси барабана до угла лопатки R_1 представлены на рис. 3. Как видно, уменьшение R_1 при сохранении радиуса барабана и вылета лопатки приводит к увеличению объема барботируемого пара. Однако чрезмерное уменьшение R_1 приводит к снижению эффективности процесса вследствие значительного сокращения зоны барботаж.

При расстоянии от оси барабана до угла лопатки $R_1 = (0,2 - 0,4)R$ максимальный объемный расход барботируемого пара приходится на начальный этап погружения (рис. 4), где высота подъема паровых пузырей минимальная. Поэтому с целью увеличе-

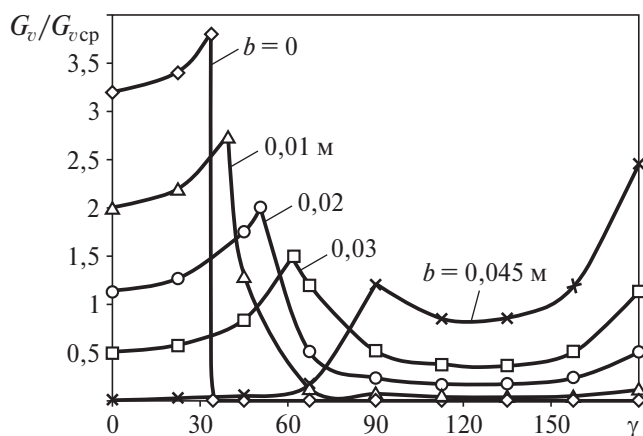


Рис. 5. Зависимости текущего объемного расхода барботируемого пара от угла поворота лопатки при $R = 0,1$ м, $R_1 = 0,05$ м, $n = 20$

ния продолжительности контакта между паром и жидкостью необходимо увеличивать R_1 , однако при этом значительно сокращается объем барботируемого пара (см. рис. 3). Следовательно, при выборе оптимального расстояния от оси барабана до угла лопатки R_1 нужно учитывать не только объем барботируемого пара, но и равномерность расхода по сечению барабана.

При вылете лопатки $b = (0,25 - 0,35)R$ отмечается максимальная равномерность объемного расхода барботируемого пара (рис. 5).

Уменьшение числа лопаток при сохранении радиуса барабана, расстояния от оси барабана до угла лопатки и вылета лопатки приводит к значительному увеличению объемного расхода барботируемого пара в центральной части контактного устройства, где обеспечивается наибольшее время контакта пара с жидкостью (рис. 6). Кроме того, минимальному числу лопаток соответствует максимальный объем барботируемого пара при различном расстоянии от оси барабана до угла лопатки (см. рис. 3).

Расчеты показали, что особенности конструктивного исполнения предлагаемого контактного устройства оказывают существенное влияние на эффективность массообменного процесса. Поэтому при проектировании струйно-барботажных контактных устройств необходимо правильно подбирать такие геометрические параметры, как расстояние от оси барабана до угла лопатки, вылет лопатки и число лопаток. Для увеличения продолжительности контакта между паром и жидкостью внутри разработанного контактного устройства необходимо создавать конструкции с минимальным числом внутренних лопаток, максимальными значениями вылета лопатки

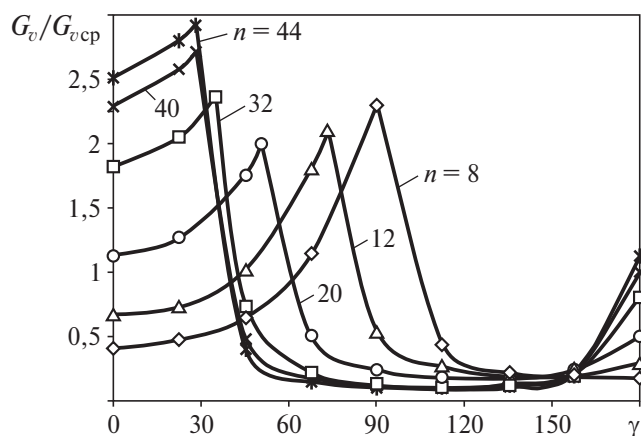


Рис. 6. Зависимости текущего объемного расхода барботируемого пара от угла поворота лопатки при $R = 0,1$ м, $R_1 = 0,05$ м, $b = 0,02$

и расстояния от оси барабана до угла лопатки. Причем вылет лопатки необходимо принимать на 5 – 10 % меньше его предельного значения.

Таким образом, результаты исследований позволяют утверждать, что применение предлагаемых контактных устройств дает возможность создавать высокоэффективные массообменные аппараты для деаэрации воды промышленных ТЭС при невысоких энергетических затратах на проведение термической деаэрации.

Список литературы

1. Ильченко О. Т. Тепло- и массообменные аппараты ТЭС и АЭС. — Киев: Вища школа, 1992.
2. Проблемы моделирования процессов хемосорбции-десорбции углекислоты в тепломассообменных аппаратах энергетических установок / А. В. Мошкарин, В. Н. Виноградов, Г. В. Ледуховский, А. А. Коротков. — Вестник Ивановского гос. энергетич. ун-та, 2010, № 2.
3. Шарапов В. И., Цюра Д. В. Термические деаэраторы. — Ульяновск: УлГТУ, 2003.
4. Ямлеева Э. У., Шарапов В. И. Об аэрации деаэрированной подпиточной воды в баках-аккумуляторах ТЭЦ. — Энергосбережение и водоподготовка, 2004, № 5 (32).
5. Копылов А. С., Лавыгин В. М., Очков В. Ф. Водоподготовка в энергетике. — М.: Издательство МЭИ, 2003.
6. Moran K., Inumaru J., Kawaji M. Instantaneous hydrodynamics of a laminar wavy liquid film. — International Journal of Multiphase Flow, 2002, № 28 (5).
7. Moshtari B., Ganji Babakhani E., Moghaddas J. S. Experimental study of gas hold-up and bubble behavior in gas-liquid bubble column. — Petroleum & Coal, 2009, № 51 (1).
8. Karwa N., Schmidt L., Stephan P. Hydrodynamics of quenching with impinging free-surface jet. — International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, № 55 (13 – 14).