

## Совершенствование вакуумных деаэраторов

Бравиков А. М., инж.

АООТ Сибтехэнерго

Экономичность вакуумных деаэраторов во многом зависит от подогрева в деаэраторе деаэрируемой воды. Чем меньше подогрев воды в деаэраторе, тем экономичнее режим деаэрации. Однако подогрев воды в деаэраторе влияет не только на экономичность режима, но и на качество деаэрации, а конкретнее – чем больше подогрев воды в деаэраторе, тем лучше качество деаэрации.

Одним из требований, предъявляемых к работе вакуумных деаэраторов, является обеспечение содержания кислорода в деаэрированной воде не более 50 мкг/кг. В этой связи оптимальным нагревом воды в деаэраторе является минимальный нагрев, при котором обеспечивается требуемое содержание кислорода в деаэрированной воде.

Опыт эксплуатации вакуумных деаэраторов показывает, что типовые вакуумные деаэраторы на разных объектах имеют разные технические характеристики. К числу таких характеристик может быть отнесен оптимальный нагрев воды в деаэраторе. Согласно [1] оптимальный нагрев воды на разных объектах составляет от 5 до 15°C. Кроме того, опыт эксплуатации вакуумных деаэраторов показывает, что оптимальный нагрев может составлять 5 – 25°C.

На рис. 1 показано содержание кислорода в деаэрированной воде в зависимости от нагрева воды в деаэраторе (дегазационные характеристики деаэраторов), полученное экспериментально в одинаковых температурных и гидродинамических

режимах на деаэраторах, установленных на разных объектах.

Кроме того, опыт эксплуатации вакуумных деаэраторов показывает, что в процессе эксплуатации дегазационная характеристика деаэратора может изменяться при неизменных температурных и гидродинамических параметрах режима работы деаэратора. При этом оптимальный нагрев воды в деаэраторе может как увеличиваться, так и уменьшаться. Причина, вызвавшая изменение дегазационной характеристики, как правило, остается неизвестной, так как теоретические положения о термической деаэрации не дают оценки данному явлению [2].

Вопрос изменения дегазационной характеристики деаэратора при неизменных температурных и гидродинамических параметрах в открытой печати впервые обсуждался в [3], где высказывалась точка зрения, что причиной изменения дегазационной характеристики деаэратора при неизменных температурных и гидродинамических параметрах режима работы является изменение кавитационной прочности деаэрируемой воды. Данное свойство воды характеризует условия, при которых в воде зарождаются и растут газовые пузырьки, и оно подробно рассмотрено в специальной литературе, например, в [4]. Согласно теории кавитации интенсивность выделения растворенных газов из воды за счет образования пузырьков зависит от кавитационной прочности воды. Чем меньше кавитационная прочность воды (в некоторых источниках она называется “объемная прочность воды”), тем интенсивнее из нее выделяются газы за счет образования пузырьков и, следовательно, тем меньше минимально необходимый нагрев воды в деаэраторе.

Из теории кавитации [4] известно, что кавитационная прочность воды зависит от многих факторов, например, от механических микроскопических примесей в жидкости, от присутствия растворенных солей в жидкости, от обработки воды давлением, от воздействия космических лучей, от гидродинамического состояния потока (от турбулентности) и др. При определении дегазационной характеристики деаэратора факторы, влияющие на кавитационную прочность деаэрируемой воды, как правило, не учитываются, а, следовательно, и кавитационная прочность деаэрируемой воды тоже не учитывается. Однако кавитационная прочность на разных объектах может быть различной.

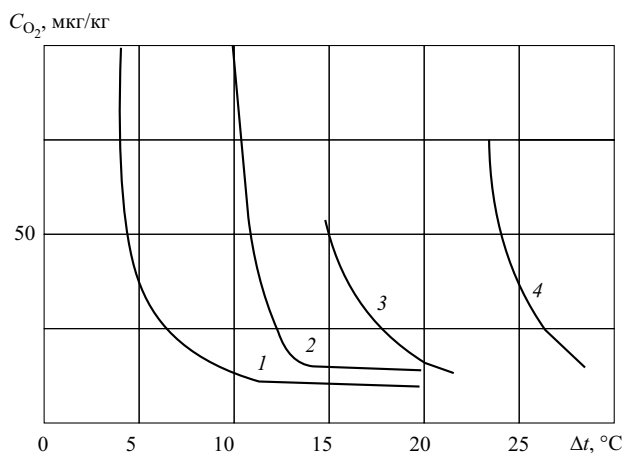
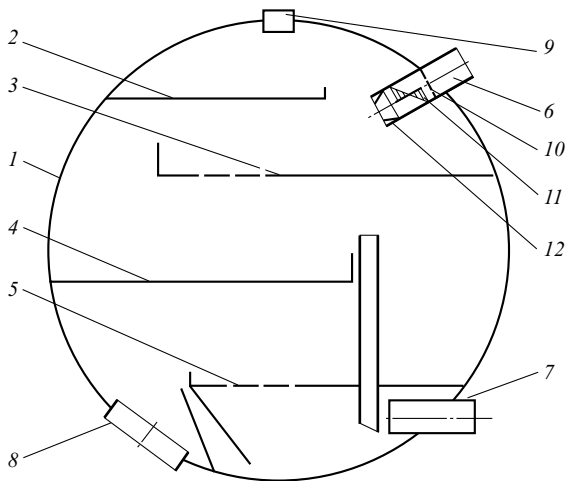


Рис. 1. Зависимости содержания кислорода в деаэрированной воде от нагрева воды в деаэраторах ДВ-400 и ДВ-800:

1 – ТЭЦ Горьковского автозавода; 2 – Усть-Каменогорская ТЭЦ; 3 – тепловые сети г. Курска; 4 – Новосибирская ТЭЦ-5



**Рис. 2. Схема реконструированных деаэраторов ДВ-400 и ДВ-800:**

1 – корпус; 2, 3, 4, 5 – тарелка; 6 – патрубок подвода неаэрированной воды; 7 – патрубок подвода греющей воды; 8 – патрубок отвода деаэрированной воды; 9 – патрубок отвода неконденсирующихся газов; 10 – решетка турбулизирующая; 11 – лопатка направляющая; 12 – сопло

Кроме того, кавитационная прочность воды может изменяться в процессе эксплуатации деаэратора. В этой связи изменяется и дегазационная характеристика деаэратора. Изменение дегазационной характеристики в процессе эксплуатации может приводить к ухудшению качества деаэрации или к необоснованно завышенному нагреву воды в деаэраторе, что экономически невыгодно.

В последнее время в совершенствовании процессов деаэрации наметилась тенденция повышения интенсивности процесса деаэрации за счет уменьшения кавитационной прочности деаэрируемой воды. Например, обработка деаэрируемой воды ультразвуком [5] улучшает качество деаэрации. Замечено также, что при повышении хлоридов в деаэрируемой воде улучшается качество деаэрации, что, вероятно, связано также с уменьшением кавитационной прочности деаэрируемой воды.

Снижение кавитационной прочности деаэрируемой воды происходит и в деаэраторе (получившем распространение в теплоэнергетике), разработанном на основе изобретения [6]. Отличительной особенностью данного деаэратора является то, что в патрубке подвода в деаэратор неаэрированной воды установлено сопло. В сопле вода разгоняется до больших скоростей и турбулизуется, в результате кавитационная прочность деаэрируемой воды уменьшается, а интенсивность выделения газов из деаэрируемой воды за счет образования пузырьков повышается.

Однако данный деаэратор имеет существенный недостаток, выражающийся в том, что перед ним требуется создавать повышенное давление неаэрированной воды. Указанный недостаток устранен

в деаэраторе, показанном на рис. 2, в котором для повышения турбулентности потока деаэрируемой воды в патрубке 6 установлены решетка турбулентности 10, винтовые направляющие лопатки 11 и сопло 12. Данный деаэратор создан на основе изобретения [7]. В разработанном деаэраторе поток деаэрируемой воды, проходя через патрубок 6, турбулизуется решеткой 10, закручивается по спирали лопатками 11 и затем поступает в сопло 12. При поступлении в сопло давление в потоке воды понижается, при этом из деаэрируемой воды интенсивно выделяются газы за счет образования пузырьков. При выходе из сопла 12 под действием центробежных сил закрученный поток распадается на мелкие капли, которые затем, двигаясь в паровом отсеке, подогреваются паром; при этом из капель, за счет диффузии, интенсивно выделяются газы.

Патрубок 6 с установленными в нем решеткой 10, лопатками 11 и соплом 12 выполняет роль форсунки, от эффективности работы которой зависит качество деаэрации воды.

Необходимым условием для распада потока воды на мелкие капли при выходе из форсунки является возрастание тангенциальной составляющей скорости течения жидкости в поперечном сечении потока от центральной оси к периферии. Данное условие может быть достигнуто за счет выбора оптимального угла закрутки направляющей лопатки.

Для определения угла закрутки направляющей лопатки определим математическую модель потока, закрученного винтовыми лопатками. Для этого зададимся законом закрутки лопатки

$$\alpha = \arctg\left(\frac{2\alpha_n r}{d_n}\right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол закрутки лопатки на расстоянии  $r$  от оси патрубка, равный углу между образующей цилиндра, соосного с патрубком, и касательной к лопатке, исходящей из выходной кромки лопатки;  $r$  – расстояние (радиус) от угла  $\alpha$  до оси патрубка;  $d_n$  – диаметр патрубка;  $\alpha_n$  – угол закрутки лопатки на расстоянии  $d_n/2$  от оси патрубка.

Составим дифференциальное уравнение элементарной струйки потока. Запишем закон сохранения энергии для элементарной струйки в форме уравнения Бернулли, считая, что жидкость идеальная

$$P + \frac{\rho}{2}(u^2 + z^2) = P_T, \quad (2)$$

где  $P$  – статическое давление элементарной струйки, образовавшейся от закрутки потока;  $\rho$  – плотность жидкости;  $u$  – тангенциальная составляющая скорости движения элементарной струйки;  $z$  – осевая составляющая скорости движения элемен-

тарной струйки;  $P_T$  – динамический напор элементарной струйки до закрутки потока.

Считаем, что угол закрутки потока равен углу закрутки лопатки.

Центробежная сила, действующая на элементарную струйку закрученного потока, равна разности давлений, действующих на боковые поверхности этой струйки, что выражается формулой

$$\frac{u^2}{r} \rho dr = dP. \quad (3)$$

Из уравнений (1), (2), (3) получаем

$$\frac{dP}{P_T - P} = \frac{2kr}{k^2 r^2 + 1}, \quad (4)$$

где

$$k = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha_n}{d_n}.$$

Решение уравнения (4) имеет вид

$$-\ln|P_T - P| = \ln \left| \frac{1}{2} r^2 + \frac{1}{2k^2} \right| + C_1. \quad (5)$$

После упрощения уравнение (5) может быть представлено в виде

$$P_T - P = \frac{2C_1}{r^2 + \frac{1}{k^2}}, \quad (6)$$

где  $C_1$  – постоянная интегрирования.

Уравнение (6) представляет математическую модель потока жидкости в патрубке, закрученного винтовыми лопатками, закон закрутки которых описан уравнением (1).

Уравнение (6) позволяет определить поле скоростей потока и плотность орошения в факеле при различных значениях  $\alpha$ , и  $d_n$ , а также определить оптимальные  $\alpha_n$  и  $d_n$  при заданном расходе воды.

На рис. 3 показана характеристика форсунки, направляющие лопатки которой рассчитаны с помощью формулы (6). Данная характеристика определена экспериментально при испытании одной из пяти форсунок, установленных в деаэраторе ДВ-800. Форсунки рассчитаны на расход воды 120 т/ч каждая при перепаде давления на форсунке 0,10 МПа.

При испытании форсунки деаэратор работал в следующем режиме:

расход недеаэрированной воды в деаэратор 575 т/ч;

температура недеаэрированной воды 26°C;

давление в деаэраторе 0,006 МПа;

давление воды перед форсункой 0,079 МПа.

Из результатов испытаний видно, что в указанном режиме пропускная способность форсунки близка расчетному значению, а плотность ороше-

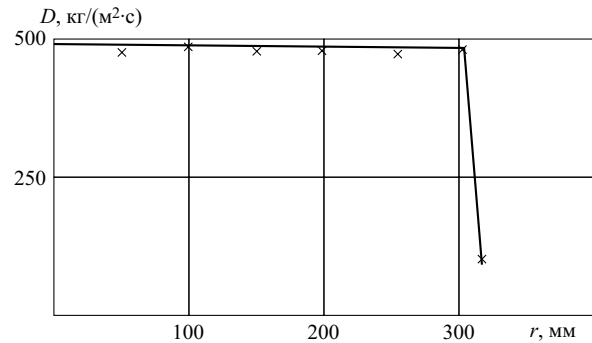


Рис. 3. Плотность орошения в поперечном сечении факела:

$r$  – расстояние от оси факела

ния одинакова по всему поперечному сечению факела.

Следует отметить, что расчетная производительность форсунки 120 т/ч определялась из условия максимально возможного расхода недеаэрированной воды в деаэратор 600 т/ч. Увеличивать производительность деаэратора более 600 т/ч не было необходимости, поскольку суммарная производительность деаэраторов, установленных на объекте, значительно превышает максимально возможный расход воды в деаэраторы.

В настоящее время в промышленной эксплуатации находится более 10 реконструированных деаэраторов, конструктивное исполнение которых аналогично деаэратору, показанному на рис. 2. Первый реконструированный деаэратор находится в эксплуатации с 1994 г. Испытания первого реконструированного деаэратора показали, что за счет реконструкции в нем уменьшился минимально необходимый нагрев воды с 24 до 16°C и понижалась минимально необходимая температура греющей воды. До реконструкции в качестве греющей среды в деаэраторе использовалась прямая сетевая вода с температурой 90°C и более и для достижения данной температуры использовался специальный подогреватель, который включался в работу при температуре прямой сетевой воды ниже 90°C. После реконструкции деаэратор обеспечивает нормальное качество деаэрации при температуре греющей воды 80°C и более. Снижать температуру греющей воды менее 80°C при испытании не было необходимости, так как для данного объекта указанная температура соответствует минимальному значению температуры прямой сетевой воды, определенной по температурному графику тепловых сетей. В этой связи данный деаэратор не испытан при температуре греющей воды ниже 80°C. Однако опыт эксплуатации реконструированных деаэраторов на других объектах показал, что снижение температуры греющей воды в них до 70°C не оказывает заметного влияния на качество деаэрации. Что касается максимальной производительности реконструированного деаэратора, то при температуре недеаэрированной воды

30°C и температуре греющей воды 70°C и более реконструированный деаэратор обеспечивает качественную деаэрацию 950 т/ч воды. Нереконструированные деаэраторы согласно [8] при температуре недеаэрированной воды 30°C могут про-деаэрировать не более 620 т/ч.

Имеется также положительный опыт эксплуатации реконструированных деаэраторов в течение длительного времени (с 1996 г.) при использовании в них в качестве греющей среды обратной сетевой воды с температурой 50 – 70°C. Опыт эксплуатации показал, что при температуре греющей воды 50 – 70°C деаэраторы стабильно обеспечивают требуемое качество деаэрации, однако производительность деаэратора при этом уменьшается и при температуре греющей воды 50°C производительность деаэратора составляет 40 – 50% номинальной производительности деаэратора.

Экономический эффект от реконструкции деаэратора ДВ-800, установленного на ТЭЦ в схеме подпитки теплосети, составляет 800 т/год условного топлива.

## Выводы

1. Кавитационная прочность воды является одним из факторов, определяющих интенсивность процесса деаэрации воды в термических деаэраторах.

2. Различие дегазационных характеристик вакуумных деаэраторов, установленных на разных объектах, вызвано различием кавитационной прочности деаэрируемой воды на этих объектах.

3. Изменение дегазационной характеристики деаэратора без изменения температурных и гидродинамических параметров режима работы деаэра-

тора происходит в связи с изменением кавитационной прочности воды.

4. Применение в вакуумных деаэраторах форсунок с направляющими винтовыми лопатками улучшает дегазационную характеристику деаэратора, а именно:

уменьшает минимально необходимый нагрев воды в деаэраторе с 24 до 16°C;

снижает минимально допустимую температуру греющей воды с 85 – 90 до 70°C.

5. Производительность реконструированного деаэратора, в конструкции которого применены форсунок с направляющими винтовыми лопатками, составляет 950 т/ч при температуре недеаэрированной воды 30°C и температуре греющей воды 70°C и более.

## Список литературы

1. *Типовая инструкция по эксплуатации автоматизированных деаэрационных установок подпитки теплосети.* М.: Союзтехэнерго, 1985.
2. *РТМ 108.030.21-78.* Расчет и проектирование термических деаэраторов. Л.: ЦКТИ, 1979.
3. *Бравиков А. М.* Разработка и исследование деаэратора перегретой воды. – *Теплоэнергетика*, 1990, № 12.
4. *Карелин В. Я.* Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. М.: Машиностроение, 1975.
5. *Водолазов О. А.* Новый способ деаэрации воды. – *Энергетик*, 1999, № 2.
6. *А.с. 1255805 (СССР).* Вакуумный деаэратор / Комарчев И. Г., Нестеренко Б. М., Качанова-Махова Н. И. Оpubл. в Б. И., 1986, № 33.
7. *Пат. 2054384 (РФ).* Термический деаэратор / Бравиков А. М. Оpubл. в Б. И., 1996, № 5.
8. *Шарапов В. И., Кувишинов О. Н.* О рабочей производительности вакуумных деаэраторов. – *Электрические станции*, 1998, № 8.

## Пассивация и консервация барабанных котлов по методу “гидразинной выварки”

Василенко Г. В., доктор техн. наук, Мурзин М. А., Масликов И. В., Матвеева Л. Ю., инженеры, Лашицкий А. П., канд. техн. наук, Елецкая М. С., Лапутько М. Л., инженеры

ЦПРП АО Ленэнерго – Северная ТЭЦ АО Ленэнерго

“Гидразинная выварка”, т.е. обработка внутренних поверхностей топочных экранов котла раствором гидразингидрата при повышенной температуре для формирования на металле труб защитной оксидной пленки, применяется в АО Ленэнерго для пассивации барабанных котлов высокого давления после химической очистки и для консервации перед выводом в длительный останов.

Согласно [1] процесс пассивации следует осуществлять при температуре 140 – 160°C в течение

10 – 12 ч (таблица). Если используемая технологическая схема не позволяет обеспечить требуемый уровень температуры, то допускается снизить ее до 120 – 140°C.

В зарубежной практике [2] пассивация металла поверхностей нагрева котла после кислотной очистки выполняется при еще более низкой температуре 93°C (здесь и далее перевод с градусов Фаренгейта) и длительности операции не менее 4 ч. При этом подогрев циркулирующего раствора гид-