



ТЕРМИЧЕСКАЯ ДЕАЭРАЦИЯ И ПУТИ СОЗДАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ПРЯМОТОЧНЫХ ДЕАЭРАТОРОВ КОМПАКТНОГО ТИПА

Васильев Д.В.

канд. техн. наук
технический директор

Успенский И.Н.

канд. техн. наук
заместитель технического директора

ООО «НПО «Новые Технологии»
г. Санкт-Петербург

Деаэрация – это удаление из воды растворенных в ней коррозионно-активных газов. Основным коррозионно-активным компонентом, содержащимся в воде, является кислород. При температуре 5 °С в 1 л воды при атмосферном давлении растворяется 13000 мкг кислорода. Коррозионно-активные газы являются причиной внутренней коррозии трубопроводов, поэтому деаэрация воды, заполняющей тепловые сети, необходима для prolongation срока службы как самих трубопроводов, так и котельного оборудования. Затраты на деаэрацию намного меньше затрат на замену трубопроводов тепловых сетей и ремонт дорогостоящего оборудо-

вания. Известно, что при использовании недеаэрированной воды, срок службы стальных трубопроводов составляет от 3 до 7 лет. Это в несколько раз меньше, чем при использовании деаэрированной воды, содержащей растворенный кислород в количестве не более 50 мкг/л.

В настоящее время в теплоэнергетике в основном применяется термическая деаэрация. В соответствии с ГОСТ 16860-88 в зависимости от температуры и давления в корпусе, термические деаэраторы разделяются на три типа: деаэраторы повышенного давления, атмосферные и вакуумные.

Деаэраторы повышенного давления работают при давлении не менее 5 кгс/см² и температуре 160 °С. Деаэрация повышенного давления используются в основном в тепловых схемах турбин, требующих глубокого удаления растворенного кислорода и углекислого газа.

Атмосферные деаэраторы работают при давлении чуть выше атмосферного на 0,1-0,3 кгс/см² и обеспечивают концентрацию кислорода в деаэрированной воде не более 20 мкг/л. При данных условиях необходим источник пара для нагрева воды до температуры 102-104 °С и обеспечения барботажа. Поэтому при наличии пара система атмосферной деаэрации получается более простой, чем система вакуумной деаэрации. Однако, если источника пара нет, то вакуумная деаэрация остается единственным возможным вариантом.

Вакуумная деаэрация происходит при давлении меньше атмосферного, поэтому вакуумные деаэраторы обязательно должны комплектоваться средствами обеспечения вакуума, например вакуумными эжекторами. Причем, чем ниже температура деаэрируемой воды, тем более глубокий вакуум должен создавать эжектор. Обычно вакуумные деаэраторы работают при температуре 60÷80 °С и вакууме –0,8 ÷ –0,5 кгс/см², обеспечивая концентрацию кислорода в деаэрированной воде не более 50 мкг/л. Такие условия являются наиболее оптимальными с точки зрения соотношения качества деаэрации и затрат на нагрев воды и поддержание вакуума.

Физически деаэрация основывается на законе Генри, описывающем зависимость равновесной концентрации газа в жидкости от парциального давления газа над поверхностью жидкости. В соответствии с данным законом равновесная концентрация растворенного газа прямопропорциональна парциальному давлению газа над поверхностью жидкости с коэффициентом, зависящим от температуры (чем больше температура, тем меньше коэффициент):

$$C = \alpha(t) \cdot (\rho_g / \rho_{ж}) \cdot (P_g / P_0) \cdot 10^6,$$

где C – равновесная концентрация газа в воде, мг/кг; $\alpha(t)$ – коэффициент абсорбции при данной температуре воды, приведенный к нормальным

условиям (760 мм рт.ст., 0 °С), м³/м³; ρ_g – плотность газа при нормальных условиях, кг/м³; $\rho_{ж}$ – плотность воды при данной температуре, кг/м³; P_g – парциальное давление газа над поверхностью воды, Па; P_0 – физическая атмосфера, Па.

Таким образом, для десорбции газа необходимо повышать температуру жидкости и снижать парциальное давление газа над поверхностью жидкости. Для этого при термической деаэрации вода нагревается до температуры насыщения, при которой из воды выделяется выпар, при этом снижается парциальное давление кислорода над поверхностью воды, пропорционально его мольной доле в парогазовой смеси, настолько, что оно становится меньше равновесного давления, соответствующего мольной доле газа в растворе:

$$PP = m(t) \cdot x,$$

где $m(t)$ – константа фазового равновесия, или коэффициент Генри, Па; x – мольная доля газа в растворе.

Это приводит к нарушению равновесной концентрации кислорода в воде и к диффузии кислорода через свободную поверхность жидкости в паровую среду. То есть происходит десорбция кислорода. Заканчивается этот процесс тогда, когда достигается равновесие.

Такой принцип деаэрации используется всеми типами термических деаэраторов, независимо от их конструкции. Наиболее известны традиционные пленочные и струйно-барботажные деаэраторы, в которых теплообмен происходит при пленочном и струйном стекании жидкости по тарелкам и барботировании жидкости паром. Однако следует отметить, что данные деаэраторы обладают весьма значительными массогабаритными показателями. Именно этот недостаток толкает многих разработчиков теплотехнического оборудования к разработке новых типов малогабаритных деаэраторов, в которых применяются различные способы интенсификации процесса массообмена и увеличения скорости массопередачи с целью уменьшения массогабаритных характеристик оборудования.

В связи с этим перед каждым разработчиком деаэратора стоит вопрос: в соответствии с какими принципами должен быть построен идеальный



деаэратор, обладающий минимальными массогабаритными показателями и при этом не уступающий классическим деаэраторам по величине остаточного содержания кислорода в деаэрированной воде? Для ответа на этот вопрос необходимо проанализировать основные факторы, влияющие на данный процесс.

Известно, что механизм десорбции, лежащий в основе процесса деаэрации, подчиняется основному уравнению массопередачи:

$$dM/d\tau = K \cdot (P_0 - P) \cdot F$$

где $dM/d\tau$ – скорость массопередачи (количество кислорода, перешедшего в единицу времени из жидкой фазы в газообразную); K – коэффициент массопередачи; P – текущее парциальное давление кислорода в парогазовой смеси; P_p – равновесное давление кислорода над жидкостью, соответствующее текущей концентрации кислорода в жидкости; F – площадь поверхности массопередачи.

Из уравнения видно, что для увеличения скорости массопередачи (левой части уравнения) необходимо увеличивать каждое из трех сомножителей правой части уравнения, а для этого достаточно соблюдать три принципа:

1. Обеспечивать наибольшую разницу между равновесным и текущим парциальными давлениями кислорода над поверхностью раздела фаз ($P_p - P$), т.е. увеличивать движущую силу процесса;
2. Создавать наибольшую площадь поверхности контакта фаз F , через которую происходит диффузия кислорода из жидкой среды в газообразную.
3. Создавать условия, приводящие к увеличению коэффициента массопередачи K .

Первый принцип реализуется в случае противоточного движения фаз. Применение противотока наиболее характерно для классических пленочных и струйно-барботажных деаэрационных колонок, в рабочую полость которых осуществляется подача чистого пара. При этом чистый пар с нулевым содержанием кислорода сначала контактирует с предварительно деаэрированной водой в барботажном отсеке, а затем поступает в пленочную или струйную колонну, где восходящий поток пара контактирует с нисходящим струйным потоком деаэрируемой воды. В случае, когда десорбирующий

агент не имеет возможности растворяться или конденсироваться при контакте с жидкой фазой, данная противоточная схема движения сред позволяет максимально увеличить движущую силу процесса и обеспечить непрерывное снижение величины парциального давления кислорода P от начала до конца процесса, что и приводит к низкому остаточному содержанию кислорода в деаэрированной воде. Однако, в классическом деаэраторе используется водяной пар, который одновременно является и греющим и десорбирующим агентом. И поскольку, как сказано выше, в классических деаэраторах применяется противоток, то температура пара всегда оказывается больше температуры воды в любом сечении аппарата. Поэтому при контакте пара и воды в струйно-барботажном деаэраторе происходит интенсивная конденсация пара на поверхности раздела фаз. Это приводит к направленному движению молекул пара к поверхности жидкости, что создает лишнее диффузионное сопротивление кислороду, т.к. препятствует оттоку кислорода из пограничного слоя газа, непосредственно примыкающего к поверхности жидкости, что увеличивает парциальное давление кислорода в пограничном слое. В результате одновременно снижаются и коэффициент массопередачи, и движущая сила процесса десорбции. Именно поэтому разработчикам струйно-барботажных деаэраторов приходится значительно увеличивать площадь поверхности контакта фаз F и время пребывания жидкости в рабочем пространстве деаэратора, чтобы скомпенсировать этот нежелательный эффект. А поскольку удельная площадь контакта фаз (ПКФ) в классическом деаэраторе действительно невелика, то для обеспечения достаточной по величине площади F при барботажном способе контакта требуется очень большой объем рабочего пространства. Это настолько существенно увеличивает размеры и, соответственно, стоимость классических деаэраторов, что проектировщики малогабаритных блочно-модульных котельных зачастую отказываются от их использования.

Таким образом, одна из причин больших размеров классических деаэраторов кроется как раз в

том, что в них совмещены две функции – нагрева и десорбции. В данном случае нагрев, сопровождающийся конденсацией пара на поверхности контакта фаз, вызывает лишнее сопротивление массопердаче и препятствует десорбции. Это противоречие заложено в основу принципа действия классического деаэратора. Разрешить его можно только создав новый деаэратор, в котором эти две функции будут принципиально разделены так, чтобы нагрев воды до необходимой температуры происходил в теплообменнике до входа воды в деаэратор. При этом давление в новом деаэраторе должно поддерживаться ниже давления насыщенных паров воды. Тогда в таком деаэраторе будет происходить не конденсация пара, а наоборот, испарение воды. Поскольку при испарении происходит одновременное снижение температуры воды, то тогда единственным вариантом движения фаз остается только прямоточное движение фаз. При прямотоке температура пара будет получаться ниже температуры воды в любом сечении аппарата, и движение пара будет происходить без конденсации. Это приведет к постоянному направленному движению молекул пара от поверхности жидкости, что не создаст лишнего диффузионного сопротивления для кислорода в пограничном слое, т.к. выделяющийся с поверхности жидкости пар будет непрерывно разбавлять пограничный слой, снижая парциальное давление кислорода в слое газа, примыкающем к поверхности жидкости. Это обстоятельство может в десятки раз увеличить коэффициент массопередачи. Таким образом, прямоток в некоторых случаях может оказаться более выгодным с точки зрения увеличения скорости массообмена, чем противоток. Проиграв незначительно в величине движущей силы, можно выиграть в десятки раз в коэффициенте массопередачи. Именно поэтому разработчики многих известных современных малогабаритных деаэраторов предпочитают обеспечивать нагрев и десорбцию раздельно.

Второй принцип наиболее эффективно реализуется в распылительных деаэраторах, в которых весь поток воды диспергируется при помощи центробежных форсунок. В таком деаэраторе ПКФ

получается очень большой при небольших размерах самого деаэратора. Удельная ПКФ может достигать $20000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, превышая удельную ПКФ в струйно-барботажных деаэраторах в сотни раз, т.к. там она составляет не более $200 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Однако, чем больше удельная ПКФ, тем мельче должны получаться частицы жидкости при распылении. Это еще одно обстоятельство, которое не способствует применению противотока. Ведь при организации противотока скорость движения пара в свободном сечении аппарата должна быть очень низкой для исключения брызгоуноса, что вызывает существенное увеличение размеров и не решает задачу снижения массогабаритных показателей. Следовательно, распылительный деаэратор для снижения габаритных размеров обязательно должен быть прямоточным. Поскольку при прямотоке средняя движущая сила процесса получается несколько меньше, чем при противотоке, то может сложиться мнение, что прямоток не позволяет в полной мере добиться предельной скорости массообмена. Ведь в случае прямотока в течение всего процесса жидкость контактирует с собственным выпаром, при этом величина P_p снижается, а величина P возрастает и приближается к P_p . Это приводит к уменьшению разности $(P_p - P)$, в связи с чем в конце процесса массообмена при прямотоке скорость массопередачи снижается. Однако этот недостаток распылительных деаэраторов является несущественным, т.к. проигрыш в средней движущей силе по сравнению с противоточными струйно-барботажными деаэраторами составляет всего десятые доли, а вот выигрыш в удельной площади контакта фаз достигает десятков и даже сотен раз.

Применение третьего принципа наиболее характерно для гидродинамических деаэраторов различных известных современных марок – щелевых, центробежных, циклонных, вихревых. Как известно, коэффициент массопередачи определяется двумя стадиями: конвективным массопереносом в ядре потока и молекулярной диффузией через пограничный слой. Причем лимитирующей стадией является именно молекулярная диффузия. При увеличении скорости движения жидкости



возрастает турбулентность потока, что приводит к увеличению скорости обновления поверхности контакта фаз, уменьшению толщины пограничного слоя и увеличению коэффициента массопередачи. Однако из-за большой скорости движения очень сильно снижается время пребывания воды в рабочей зоне деаэратора, так что процесс десорбции зачастую не успевает полностью завершиться. А увеличение размеров рабочей зоны не дает эффекта, т.к. из-за действия сил трения скорость движения жидкости очень быстро падает, что снижает коэффициент массопередачи. Но, тем не менее, даже при очень небольших габаритах подобные деаэраторы за счет высокого коэффициента массопередачи позволяют в вакуумном режиме снижать содержание кислорода в воде до 50 раз. Этого, конечно, не достаточно, чтобы снизить содержание кислорода от величины 13000 мкг/л на входе до 50 мкг/л на выходе, но если оснастить подобный деаэратор второй ступенью, то можно получить желаемый уровень деаэрации при весьма незначительных габаритах деаэратора.

Таким образом, практически во всех известных современных деаэраторах имеются свои недостатки. Одни имеют слишком большие габариты, в других не обеспечивается достаточной площади контакта фаз, в-третьих не создается достаточной движущей силы, в-четвертых получается низкий коэффициент массопередачи, в-пятых слишком мало время пребывания воды в рабочей зоне.

В связи с этим, остается актуальным вопрос создания новых компактных интенсифицированных деаэраторов, в которых использовались бы все три вышеуказанных принципа интенсификации массообмена и которые имели бы меньшие, по сравнению с классическими деаэраторами, массогабаритные характеристики.

На наш взгляд, данный тип деаэраторов должен быть двухступенчатым по конструкции и прямоточным по принципу действия, без подачи греющей среды в деаэратор, с оптимально близко расположенными относительно друг от друга первой и второй ступенями. Это позволит реализовать все

вышеуказанные принципы интенсификации массообменных процессов и выполнить деаэратор конструктивно компактным с минимальными массогабаритными характеристиками.

В связи с этим, данный тип деаэратора должен иметь эффективное устройство распыла жидкости первой ступени, а также иметь такое конструктивное исполнение второй ступени, при котором обеспечивается пенный режим, и, кроме того, иметь максимально компактное расположение второй ступени относительно первой, определяющее массогабаритные характеристики деаэратора в целом.

Принцип работы предполагаемого компактного интенсифицированного деаэратора может быть следующим: вода, предварительно нагретая до необходимой температуры, при которой должен происходить процесс деаэрации, подается в рабочую полость первой ступени деаэратора, проходя через устройство эффективного распыла жидкости (например, центробежные форсунки). При этом работа создания поверхности контакта фаз должна обеспечиваться за счет потенциальной энергии давления жидкости перед форсунками (чем больше давление, тем больше площадь контакта фаз). Давление в полости деаэратора должно поддерживаться ниже давления насыщения нагретой воды, тогда при распылении из воды будет выделяться большое количество пара. Это приведет к значительному снижению парциального давления кислорода в парогазовой смеси и существенному увеличению движущей силы. Необходимо отметить, что кинетическая энергия образующейся парогазовой смеси на выходе первой ступени деаэратора будет иметь достаточно большую величину, поэтому ее можно повторно использовать для обеспечения массообменного процесса во второй ступени.

Далее двухфазная смесь должна поступать во вторую ступень деаэратора, где происходит повторное формирование большой площади контакта фаз, но уже не в капельном, а в пенном режиме. При этом работа создания поверхности контакта фаз обеспечивается за счет кинетиче-

ской энергии движения парогазовой смеси, выделившейся в первой ступени деаэратора. В пенном режиме за счет высокой скорости обновления поверхности существенно возрастает коэффициент массопередачи – в десятки раз больше, чем в струйно-барботажных и в сотни раз больше, чем в пленочных и насадочных деаэраторах.

Таким образом, только одновременное применение всех трех вышеуказанных принципов интенсификации массообмена, позволит создать компактный универсальный деаэратор, который сможет одинаково успешно осуществлять как процесс вакуумной, так и процесс атмосферной деаэрации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, – 1981. – 811 с.
2. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. Распыливание жидкости форсунками. – М.: ГЭИ, – 1962. – 264 с.
3. Кутателадзе С.С., Старикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, – 1976. – 296 с.
4. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, – 1984. – 255 с.
5. Мухленов И.П., Тарат Э.Я. Пенный режим и пенные аппараты. – М.: Химия, – 1977. – 303 с.
6. Лойцянский Г.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, – 1978. – 736 с.

- **Сверхмалые габариты и вес**
(за счет интенсивного массообмена при большой поверхности контакта фаз).

- **Низкая цена** (малая металлоемкость).

- **Простота и надежность конструкции**
(легкое и дешевое техобслуживание).

- **Высокая энергоэффективность**
(полная утилизация теплоты выпара).

- **Устойчивая гидравлика**
(отсутствие подачи греющей среды).

- **Универсальность** (работает как в вакуумном, так и в атмосферном режимах).

- **Простая автоматизация.**



Струйные вихревые деаэраторы СВД
ООО "НПО "Новые Технологии" –
универсальные
прямоточные деаэраторы
компактного типа

ООО "НПО "Новые Технологии"
194223, г. Санкт-Петербург,
пр. Мориса Тореза, д. 68
Тел./факс: (812) 322-97-79, (812) 448-36-93
e-mail: sales@newt.spb.ru www.newt.spb.ru