

Щелевые деаэраторы КВАРК – эффективное устройство для деаэрации жидкости

О.М. Кувшинов, главный конструктор МПО «КВАРК»

Введение

Борьба с коррозией – одна из важнейших технологических и экономических задач индустриальной эпохи. В первой половине прошлого века коррозия уничтожала до 40% от общего объема производимой стали. Уже больше 100 лет усилия многих ученых во всем мире направлены на создание способов и технологий защиты конструкций от коррозии. Однако даже в настоящее время эта величина составляет около 20% от общего производства основного конструкционного материала – углеродистой стали.

Защита от коррозии энергетического оборудования и трубопроводов – одно из приоритетных направлений в разработке способов антикоррозионной защиты.

Важность данного направления объясняется повышенной значимостью энергоснабжения для любого промышленного предприятия и населенного пункта. Последствия от аварий на источнике теплоэнергоресурсов либо при их транспортировке приводят к большим экономическим и технологическим потерям конечного промышленного потребителя, повышают социальное напряжение, замедляют темпы экономического роста.

Экономические потери даже от незначительных аварий на оборудовании и тепловых сетях котельных, ТЭЦ и других энергоисточников по вине коррозии как правило превышают затраты на профилактику данных аварий в 5-20 раз.

Косвенные экономические потери от последствий аварий средней тяжести превышают профилактические меры в 20-100 раз.

Совокупные потери от максимально возможной аварии могут значительно превысить балансовую стоимость энергетического предприятия, привести к банкротству конечных потребителей теплоэнергоресурсов и социальному взрыву.

Основным профилактическим мероприятием, предотвращающим коррозию энергетического оборудования и трубопроводов, является деаэрация - завершающая стадия комплексного технологического процесса водоподготовки, предназначенная для удаления из питательной воды котлов и подпиточной воды теплосетей растворенных коррозионно-активных газов.

При кажущейся физической простоте, процесс деаэрации довольно сложно организуем технологически. Для эффективной защиты от коррозии требуется удаление газов до очень низких остаточных концентраций: для котлов – до 0,08% от начального значения, а для теплосетей – до 0,4%, т.е. необходимо снизить количество растворенных газов в 250-1250 раз. Удаление из воды 90-95% газов, как правило, не представляет технической трудности. Однако в связи с тем, что скорость газоудаления значительно замедляется по мере снижения остаточной концентрации, именно оставшиеся в воде 5-10% газов и приводят в буквальном смысле к разрушительным последствиям для теплоэнергетического оборудования и трубопроводов.

На практике, до 50% отопительно-производственных котельных не соблюдают действующие нормы по остаточному содержанию растворенных газов для паровых и водогрейных котлов, до 75% постоянно превышают аналогичные нормы для тепловых сетей.

Факты аварий различной тяжести на тепловых сетях, регулярно освещающиеся СМИ – это только надводная часть айсберга. Проблема состоит в том, что регулярная замена труб и котлов не устраняет причину коррозии данных труб и котлов.

Существующее оборудование для деаэрации было разработано еще в первой половине прошлого века и практически в неизменном виде продолжает закладываться в проекты, устанавливаться и эксплуатироваться на теплоэнергетических объектах. Эти деаэраторы морально устарели и содержат в себе технические противоречия, которые не позволяют добиться устойчивого газоудаления до требуемых норм в необходимом диапазоне режимов и нагрузок.

По различным оценкам, общая сумма прямых потерь экономики от коррозии составляет от 1 до 3% валового внутреннего продукта. Для РФ, ВВП которой в 2005 г. составил 21 665 млрд. руб., сумма потерь может быть оценена в размере от 215 до 650 млрд. руб., что сравнимо с валовым региональным продуктом, например, Московской области или всего Северо-Западного федерального округа.

Минимум 10% этих потерь можно избежать, используя современное высокоэффективное оборудование для удаления из воды коррозионно-активных газов. Таким образом, максимальный экономический эффект от внедрения современного деаэрационного оборудования может составить от 21 до 65 млрд. руб. в год. Эффект от снижения косвенных потерь трудно поддается исчислению, но, очевидно, составляет сотни миллиардов рублей. А для аварий, последствия которых могут привести к потере здоровья или гибели людей, косвенные потери вообще не могут быть выражены в денежных единицах.

К основным коррозионно-активным газам относятся кислород O_2 и диоксид углерода CO_2 , которые растворяются в воде при ее контакте с атмосферным воздухом. Дополнительно

растворенная и химически связанная углекислота появляется в воде на стадии умягчения в процессах H- и Na-катионирования [4].

Из других растворенных газов, хлор Cl_2 и его соединения попадают в воду при хлорировании сырой воды, водород H_2 – при коррозии внутренних поверхностей теплосилового оборудования, аммиак NH_3 – в результате аминирования питательной воды, либо при использовании в системе подготовки воды NH_4 -катионитовых фильтров, сернистый ангидрид SO_2 и сероводород H_2S - при обработке воды сульфитом натрия, азот N_2 в плане коррозии является нейтральным. Помимо этого, в некоторых видах артезианских подземных вод в больших количествах могут содержаться сероводород H_2S , метан CH_4 и другие газы.

На сегодня в промышленности используются химический, акустический, термический (диффузионная десорбция) и гидродинамический (принудительная десорбция) способы удаления из воды растворенных газов.

Химический способ используется в основном для удаления растворенного кислорода в системах с невысоким расходом обрабатываемой воды. К нему относятся обработка воды гидразин-гидратом (левоксином), железом и сульфитирование.

Основными ограничениями химического способа деаэрации являются высокая стоимость и токсичность реагентов, дополнительные затраты на контроль за их концентрацией в системе, удаление продуктов реакции из системы, а также большие затраты на эксплуатацию химических установок. Помимо этого, химический способ требует постоянного контроля и переналадки установки при изменении исходного состава обрабатываемой воды, например, при сезонных сменах поверхностных вод, включения в систему водоснабжения дополнительных источников, скважин и т.п.

Акустический способ деаэрации сводится к воздействию на предварительно диспергированную воду ультразвуковыми волнами.

При облучении воды ультразвуком интенсивностью порядка 1 Вт/см^2 происходит снижение равновесной растворимости газов на 30÷50%, подвижность газовых включений возрастает примерно в 1000 раз, что приводит к коагуляции пузырьков с последующим выходом из воды под действием Архимедовой силы [9].

В результате акустического воздействия из воды удаляется не только кислород, но и другие растворенные газы, однако невысокая глубина деаэрации, большая потребляемая мощность (в среднем 1 кВт/м^3 обрабатываемой воды) и невозможность удаления химически связанных форм CO_2 ограничивают применение ультразвуковых деаэраторов локальными установками небольшой производительности в пищевой и фармацевтической промышленности.

Традиционный способ деаэрации

Традиционным способом удаления из воды всех растворенных в ней газов, нашедшим широкое распространение в энергетике, является термическая или диффузионная десорбция.

Сущность десорбции заключается в процессе установления равновесия между жидкой и парогазовой фазами в соответствии с законом Генри, согласно которому концентрация растворенного газа пропорциональна парциальному давлению этого газа над поверхностью жидкости [2].

Концентрация растворенного в воде газа выражается уравнением:

$$C_r = K_r \cdot P_r = K_r (P_{\text{общ}} - P_{H_2O} - \Sigma P_{\text{ост}}), \quad (1)$$

где C_r – концентрация растворенного газа;

K_r – коэффициент адсорбции газа водой;

P_r – парциальное давление газа;

$P_{\text{общ}}$ – общее давление парогазовой среды;

P_{H_2O} – парциальное давление водяного пара;

$\Sigma P_{\text{ост}}$ – суммарное парциальное давление остальных газов в парогазовой среде.

Таким образом, основным условием удаления газа из воды путем десорбции является снижение его парциального давления над водой. Добиться этого можно как снижением общего давления парогазовой смеси над водой (при $P_{\text{общ}} \rightarrow 0$, также $P_r \rightarrow 0$), так и уменьшением парциального давления данного газа. На практике в последнем случае снижение P_r газа достигается увеличением парциального давления водяных паров ($P_{H_2O} \rightarrow P_{\text{общ}}$) над поверхностью воды и постоянным отводом газа из рабочего объема деаэрационного аппарата с выпаром.

Теоретически содержание газа в воде соответствует закону Генри только в равновесных условиях. Движущей силой процесса десорбции является разность между фактической концентрацией газа в воде и его равновесной концентрацией, соответствующей парциальному давлению в парогазовой среде. Скорость десорбции газа из воды в общем виде выражается уравнением:

$$-\frac{dC_r}{d\tau} = (C_r - C_r^p) \cdot F \cdot k, \quad (2)$$

где C_r – концентрация удаляемого газа в данный момент времени;

τ – время;

C_r^P – равновесная концентрация, соответствующая парциальному давлению этого газа над водой;

F – удельная поверхность раздела фаз;

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от характерного диффузионного пути (расстояния для выхода газа из жидкости в парогазовое пространство).

Очевидно, что парциальному давлению $P_r=0$ соответствует концентрация $C_r^P=0$. Приняв в уравнении

(2) $C_r^P=0$, разделив переменные и проинтегрировав для концентрации газа в пределах от C_r до 0, а для времени от 0 до T , получим:

$$-\int_{C_r}^0 \frac{dC_r}{C_r} = k \cdot F \cdot \int_0^T dt \quad \text{или} \quad k \cdot F \cdot T = \infty \quad (3)$$

Так как $k \cdot F$ – величина конечная и положительная, то $T \rightarrow \infty$. Отсюда следует, что даже при $P_r = 0$ невозможно полное удаление газа, поэтому на практике приходится ограничиваться остаточным содержанием газа в деаэрируемой воде.

Помимо этого, диффузионный по своему механизму процесс удаления газов из воды существенно замедляется при низких остаточных концентрациях. Так, в кипящей в открытом сосуде при атмосферном давлении воде концентрация кислорода через 5 минут после начала кипения составляет 100 мкг/л, т.е. примерно в 120 раз меньше начального значения, а через 20 минут – 17 мкг/л [8]. Не трудно подсчитать, что по мере роста глубины газоудаления, его скорость за 25 минут замедлилась в 82 раза.

Из вышеизложенного очевидно, что в общем случае эффект дегазации можно повысить одним из следующих способов либо их сочетанием:

- 1) увеличением температуры деаэрируемой воды;
- 2) увеличением удельной поверхности раздела фаз;
- 3) увеличением времени взаимодействия фаз в процессе деаэрации.

Наиболее существенно на эффект деаэрации влияет повышение температуры воды, что обусловлено ростом скорости десорбции по водяной фазе и снижением парциального давления газа из-за увеличения давления пара.

Повышение температуры проявляется в следующих факторах:

- a) увеличивается давление пара и количество выпара, что приводит к снижению равновесной концентрации газа C_r^P (ф-ла 2) и его относительного парциального давления;
- b) увеличивается коэффициент диффузии газа в воде (входит в параметр k ф-лы 2);
- c) уменьшается коэффициент адсорбции газа водой (уменьшается C_r^P).

Именно вследствие положительного комбинированного воздействия повышения температуры на процесс дегазации широкое применение нашли термические деаэраторы, которые в соответствии со стандартом [1] делятся на следующие группы:

- деаэраторы повышенного давления с абсолютным рабочим давлением 0,6-1,0 МПа;
- деаэраторы атмосферного давления с абсолютным рабочим давлением 0,11-0,13 МПа;
- вакуумные деаэраторы с абсолютным рабочим давлением 0,015-0,08 МПа.

Термические деаэраторы предназначены для удаления из жидкости растворенных коррозионно-активных газов в системах питания паровых и водогрейных котлов, подготовки подпиточной воды тепловых сетей, удаления растворенного воздуха в технологических циклах пищевых, фармацевтических, нефтехимических производств, а также в иных технологических схемах, в которых требуется деаэрация жидкости.

Реализованная в *атмосферных* деаэраторах схема дегазации работает при давлении, близком к атмосферному (~0,12 МПа) и конечной температуре воды порядка 102÷104 °С. Наиболее эффективный двухступенчатый атмосферный деаэратор состоит из деаэрационной колонки (основана на струйно-капельном механизме деаэрации) и барботажной ступени, встроенной в бак-аккумулятор, в которой вода прогревается барботажем (пробулькиванием) пара до температуры порядка 102÷104 °С и выдерживается достаточно длительное время (~20-40 мин). Выпар из атмосферного деаэратора находится на уровне 2-3 кг на 1 тонну деаэрируемой воды.

Вакуумные деаэраторы, как правило, работают при температурах от 60 до 70 °С и давлениях 0,02÷0,03 МПа. Они отличаются большей материалоемкостью, чем атмосферные, а также дополнительными энергетическими затратами на создание разрежения и отсос выпара, который составляет 4÷6 кг на 1 тонну обрабатываемой воды. Однако вакуумные деаэраторы зачастую являются единственным решением при организации деаэрации в системах с отсутствием греющего пара, в водогрейных котельных, ЦТП и т.п.

Уровень температуры, при котором производится обработка воды в деаэраторе, особенно влияет на остаточное содержание углекислоты, которая в отличие от кислорода (субмолекулярная форма растворения в воде) может находиться как в форме молекул CO_2 и H_2CO_3 , так и в виде ионов CO_3^{2-} и HCO_3^- [13].

Количественное соотношение между различными формами зависит от pH воды и температуры. Кроме того, разложение бикарбоната NaHCO_3 согласно уравнению



способствующее выходу диоксида углерода, происходит интенсивно лишь в при температурах свыше 100°C .

Это обстоятельство важно учитывать при эксплуатации вакуумных деаэраторов, в которых процесс деаэрации происходит при пониженной температуре. Поскольку при этом растворимость газов в воде растет, а коэффициенты массопереноса в жидкой фазе уменьшаются, для достижения необходимой глубины деаэрации интенсивность обработки воды в вакуумных деаэраторах (степень диспергирования, интенсивность барботажа, норма выпара) должна быть намного выше, чем в деаэраторах других типов.

Процесс деаэрации элементарного объема воды в традиционном термическом деаэраторе состоит из следующих стадий:

1-я стадия – нагрев деаэрируемой воды до температуры, близкой к температуре насыщения в струйно-капельной или пленочной (насадочной) ступени деаэратора;

2-я стадия – частичное удаление растворенных газов в струйно-капельной ступени путем молекулярной диффузии;

3-я стадия – перегрев деаэрируемой воды на несколько градусов выше температуры насыщения в барботажной ступени деаэратора;

4-я стадия – перенос газа к границе раздела фаз вода–парагазовая среда в барботажной ступени деаэратора путем турбулентной диффузии;

5-я стадия – удаление газов из рабочего объема деаэратора с выпаром.

Наибольшая интенсивность газоудаления имеет место в барботажной ступени, где реализуется пузырьково-пенный режим взаимодействия пара и деаэрируемой жидкости [14]. Эффективность данного режима, оцененная величиной поверхности взаимодействия фаз, от 3 до 10 раз выше по сравнению со струйно-капельным режимом.

В идеальном деаэраторе для эффективной деаэрации было бы достаточно одной барботажной ступени. Однако это возможно реализовать лишь при постоянном расходе и неизменной температуре деаэрируемой жидкости, близкой к температуре насыщения. Это объясняется тем, что эффективность дегазации в барботажном устройстве в основном зависит от его гидродинамической устойчивости, а гидродинамическая устойчивость, в свою очередь, определяется температурой жидкости, поступающей в деаэраторный бак. Очевидно, что в реальных условиях, когда процессы деаэрации совмещены с процессами предварительного подогрева в самом деаэраторе, а температура и расход деаэрируемой воды колеблются в значительных пределах в зависимости от сезонных и технологических факторов, реализация такого «идеального» термического деаэратора невозможна. Поэтому для предварительного подогрева воды перед барботажной ступенью применяется струйно-капельная ступень деаэратора (деаэрационная колонка).

Кинетика десорбции в традиционных деаэраторах определяется максимальной разностью между равновесным давлением газа в воде и его парциальным давлением над водой и конструктивно обеспечивается за счет противотока жидкостной и паровой фаз и количества выпара.

Однако, противоток, являющийся определяющим положительным фактором непосредственно для деаэрации, отрицательно влияет на гидродинамическую устойчивость работы струйно-капельной ступени (деаэрационной колонки). Эта ступень, предназначенная в основном для подогрева исходной воды, имеет значительные ограничения по скорости движения фаз (т.е. по количеству греющего пара и выпара) в связи с опасностью влагуноса в магистраль выпара и возникновения режима захлебывания.

При технологическом изменении режима эти ограничения ведут к недогреву воды в струйной ступени, нарушению гидродинамически устойчивой работы барботажной ступени, гидроударам, проскокам недеаэрированной воды.

Помимо этого, в струйно-капельной ступени происходит интенсивное обратное газонасыщение деаэрируемой воды за счет ее контакта с выпаром, содержащим большое количество коррозионно-активных газов, что также негативно влияет на качество деаэрации.

Таким образом, традиционные термические деаэраторы имеют в своей конструкции неустраняемые противоречия, которые отражаются на эффективности и надежности их работы.

Основное физическое ограничение процесса десорбции газа из воды в одноступенчатых термических деаэраторах связано с низкой скоростью диффузионного механизма переноса растворенного газа к межфазной границе вода - парагазовая среда.

Кроме того, совмещение в традиционных термических деаэраторах функции нагрева воды до рабочей температуры и функции непосредственно деаэрации крайне отрицательно воздействует на организацию сложных теплообменных процессов, приводит к необходимости использования двухступенчатой компоновки, повышению материалоемкости, усложнению конструкции деаэратора, нестабильности режима, трудности регулирования.

Разделение по аппаратному оформлению функций подогрева и деаэрации в принципе имеет место в некоторых модификациях атмосферных и вакуумных деаэраторов. Однако принципиально процесс деаэрации в них организован на традиционном уровне, и, в конечном счете, имеет ряд недостатков, которые в итоге приводят к снижению эффективности деаэрации, высокой материалоемкости и сложности регулирования.

Итак, к основным недостаткам традиционных термических деаэраторов относятся:

1. Гидродинамическая неустойчивость струйной ступени, ограничение по количеству удельного выпара из-за опасности режима захлебывания и выноса воды в магистраль выпара.
2. Гидродинамическая неустойчивость барботажной ступени, наличие гидроударов, частые повреждения барботажных устройств, тарелок, перегородок и других элементов конструкции.
3. Высокая чувствительность к температурному режиму и стабильности давления в рабочей зоне, сложность наладки, инерционность регулирования процесса деаэрации.
4. Сложность конструкции и низкая ремонтпригодность.
5. Высокая материалоемкость. Так, удельная материалоемкость только атмосферных деаэрационных колонок без барботажной ступени составляет 4÷38 кг/т, а материалоемкость вакуумных деаэраторов - 10÷95 кг на 1 т обрабатываемой воды.

Современные способы деаэрации

Современный подход к деаэрации воды основан на физических законах, определяющих механизм растворения газа в воде, и способах воздействия на жидкость, способствующих уменьшению равновесной концентрации растворённого газа, помимо термического воздействия.

Данный подход базируется на следующих принципах.

Во-первых, в современном деаэраторе стадии подогрева воды и собственно дегазации *принципиально разделены*, что позволяет значительно повысить эффективность вышеуказанных процессов и применить при подогреве воды до необходимого уровня наиболее прогрессивные решения, такие как интенсифицированные кожухотрубчатые теплообменные аппараты, струйные подогреватели, пластинчатые теплообменники и т.п.

Во-вторых, удаление газов из воды в современном деаэраторе производится с помощью механизма *принудительной десорбции*.

Теоретически механизм *принудительной десорбции* состоит в следующем.

Растворимость газов в воде объясняется определённой “рыхлостью” структуры жидкости, наличием своеобразных пустот. К примеру, в насыщенном солевом растворе растворимость газов падает примерно в 10 раз [8]. При испытании жидкости на разрыв, ее прочность для реальной воды составляет 0,1÷1,0 МПа, а для полностью дегазированной воды увеличивается до уровня 10^3 МПа, причем разрыв жидкости происходит в местах нахождения пузырьков газа.

Согласно термодинамической теории, в чистой жидкости газ должен раствориться до субмолекулярных размеров, однако присутствие примесей в виде нерастворимых гидрофобных частиц обеспечивает устойчивое существование газовой фазы в виде пузырьков размерами порядка 10^{-7} м [7]. Пузырьки таких размеров обладают ничтожной подъёмной силой и удерживаются в воде броуновским движением. Однако именно наличие таких пузырьков способствует выделению газов.

Значительное выделение газов из воды может происходить даже без термического воздействия. Так, при дросселировании воды в область пониженного давления через насадки различной конфигурации, степень дегазации составляет 41% при избыточном давлении ~0,25 МПа и практически 99 % при давлении ~0,6 МПа [7]. Данный эффект объясняется облегченным разрывом воды в области нахождения газовых включений [9].

При вводе в рабочий объем деаэрационного устройства воды, перегретой выше температуры насыщения, соответствующей давлению в этом объеме, в результате комбинированного гидродинамического воздействия и фактора вскипания происходит диспергирование потока. Образующийся двухфазный поток характеризуется обособлением жидкой и парогазовой среды, причем объемное соотношение фаз зависит от удельного расхода выпара, т.е. степени перегрева воды. Движущим фактором десорбции является уменьшение концентрации растворённого газа в последовательных процессах дробления жидкости и коагуляции капель.

Вскипание жидкости в соответствии с термодинамической теорией фазовых превращений происходит на газовых пузырьках, поэтому выход газов и образование выпара совпадает по времени и месту и является быстротекущим процессом без подключения диффузионного механизма [10].

Вышеописанный принцип газоудаления в полном объеме реализован в разработанном компанией «КВАРК» щелевом деаэраторе. [17].

Принципиальная конструкция щелевого деаэратора КВАРК показана на рисунке 1.

При работе деаэратора деаэрируемая вода поступает через патрубок (патрубки) подвода воды на щелевые сопла, где происходит её дробление и значительное увеличение скорости потока. Далее поток направляется на профилированную криволинейную поверхность, где происходит разделение парогазовой и водяной фаз. Вода через термическую ступень стекает в патрубок (патрубки) отвода деаэрированной воды. Парогазовая смесь (выпар) направляется в зону охлаждения выпара, где происходит его конденсация на каплях охлаждающей воды, распыливаемой форсунками встроенного охладителя выпара. Конденсат выпара сливается через патрубок отвода конденсата. Неконденсирующиеся коррозионно-активные газы отводятся из деаэратора через воздушную свечу в атмосферу, либо отсасываются вакуум-эжектором (вакуумным насосом).

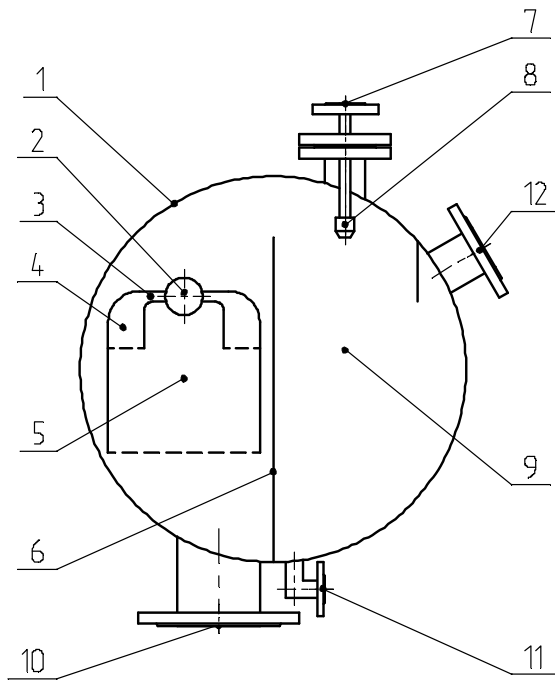


Рис.1.

1. Корпус.
2. Патрубок подвода деаэрируемой воды.
3. Щелевые сопла.
4. Зона принудительной десорбции.
5. Зона термической десорбции.
6. Перегородка охладителя выпара.
7. Патрубок подвода охлаждающей воды.
8. Форсунка охладителя выпара.
9. Зона охлаждения выпара.
10. Патрубок отвода деаэрированной воды.
11. Патрубок слива конденсата.
12. Патрубок отвода неконденсирующихся газов.

Резкое увеличение относительной поверхности жидкости при истечении из щелевых сопел в совокупности с малой длиной диффузионного пути способствуют высокой скорости десорбции [11]. И наоборот, быстрая коагуляция капель при дальнейшей центробежной сепарации двухфазного потока препятствует обратной адсорбции газа водой, поскольку многократно уменьшается поверхность жидкости и увеличивается характерный путь диффузии [12].

Эффект разделения парогазовой и жидкой фаз на криволинейной поверхности определяется профилем кривизны поверхности и разностью плотностей фаз.

Возникающая при этом Архимедова сила $F_{Арх}$, определяемая по формуле

$$F_{Арх} = (\rho_{в} - \rho_{пг}) \cdot V_{п} \cdot a_{ц}, \quad (5)$$

где $\rho_{в}$ – плотность воды,
 $\rho_{пг}$ – плотность парогазовой среды,
 $V_{п}$ – объем пузыря,
 $a_{ц}$ – центростремительное ускорение,

оказывается достаточной для выталкивания парогазового пузыря на свободную поверхность потока.

При удельном расходе выпара $g_{п}$ объемное содержание воды ϕ в двухфазном потоке может быть оценено соотношением:

$$\phi = \left(1 + \frac{\rho_{в}}{\rho_{п}} \cdot g_{п}\right)^{-1}, \quad (6)$$

где $\rho_{в}$, $\rho_{п}$ – плотность воды и пара соответственно,

$g_{п}$ – удельный расход выпара ($g_{п} = \frac{G_{п}}{G_{в}}$; $G_{в}$ – расход воды).

Поскольку $\rho_{в} \approx 1000 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{п} \approx 0,6 \text{ кг/м}^3$ [3, 5], то уравнение (6) преобразуется к виду:

$$\phi \approx (1 + 1660 \cdot g_{п})^{-1}, \quad (6^*)$$

а значения ϕ составят величину:

$\varphi = 0,231$ при $g_n=0,002$;

$\varphi = 0,167$ при $g_n=0,003$;

$\varphi = 0,108$ при $g_n=0,005$.

Таким образом, в указанном диапазоне g_n структура двухфазного потока после щелевого сопла изменяется от пузырьковой до пенно-капельной, что соответствует структуре двухфазной среды в наиболее эффективной барботажной ступени традиционного термического деаэратора.

Для дополнительной стабилизации работы в режимах минимальной производительности, в конструкции щелевого деаэратора КВАРК организована пленочно-капельная ступень течения.

Величина удельного объема выпара в щелевом деаэраторе не оказывает влияние на гидродинамическую устойчивость работы деаэратора. Модификация деаэратора со встроенным охладителем выпара позволяет полностью утилизировать теплоту выпара, а также дополнительно регулировать глубину деаэрации за счет изменения температуры деаэрируемой жидкости и количества выпара.

Следует отметить, что данный деаэратор не является в традиционном понимании прямоточным или противоточным деаэратором, поэтому к нему не применима теория расчета обычных термических атмосферных и вакуумных деаэраторов. В рабочей зоне щелевого деаэратора потоки деаэрируемой воды и выпара несколько раз меняют свое направление, однако для процесса десорбции это не имеет никакого значения, т.к. движущей силой принудительной десорбции является не разность парциальных давлений удаляемого газа, а гравитационное поле гидродинамической природы.

Точно так же понятие «массообменная эффективность» применительно к щелевым деаэраторам не имеет никакого смысла, поскольку деаэрация в них не связана с массообменом, по крайней мере с тем массообменом, от эффективности которого зависит качество деаэрации в традиционных конструкциях.

Деаэраторы ДЩ подразделяются на атмосферные, вакуумные и повышенного давления (табл.1). Если температура деаэрируемой воды по технологическим причинам не может быть выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, то для обеспечения устойчивой десорбции необходимо создание вакуума, который бы обеспечил перегрев деаэрируемой воды относительно температуры насыщения на $2-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Суть принудительной десорбции остается неизменной для любого типа деаэратора, хотя сама десорбция и протекает по-разному из-за изменения растворимости газов в зависимости от температуры воды. В связи с этим типы щелевых деаэраторов отличаются конструктивными характеристиками и, соответственно, материалоемкостью. Удельная материалоемкость деаэраторов ДЩ составляет $2-10$ кг на 1 т деаэрируемой воды.

При наличии в деаэрируемой воде углекислоты в связанном диссоциированном состоянии применяется ее выдерживание при соответствующей температуре в баке-аккумуляторе в течение $20-40$ минут или более в зависимости от исходного содержания NaHCO_3 . Бак-аккумулятор может быть любой формы, барботаж в нем не требуется. Интенсивное перемешивание деаэрированной воды в баке осуществляется за счет воды стекающей из деаэратора. Для удаления продуктов распада бикарбоната натрия рекомендуется организация вентиляции зеркала воды (надводного пространства бака) паром через воздушную свечу из расчета $1-2,5$ кг/т деаэрируемой воды.

Поскольку окончательно процесс распада бикарбоната натрия завершается при температуре свыше $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. во время технологических процессов перегрева воды или генерации пара, полное устранение химически связанного CO_2 в любых термических деаэраторах атмосферного и вакуумного типов невозможно в принципе, и задача стабилизации воды является комплексной задачей проектирования и наладки системы химводоподготовки конкретной системы.

Во многих случаях реальной эксплуатации щелевых деаэраторов была отмечена высокая эффективность их работы совместно со струйными подогревателями КВАРК типа ПВС [18, 19]. Так, при подогреве воды, подаваемой на деаэрационное устройство с помощью струйного подогревателя, в подавляющем большинстве случаев остаточная концентрация растворенного кислорода оказывалась меньше на $5-10$ мкг/л, а полная деаэрация производилась при температуре на $2-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, чем при подогреве традиционным способом в поверхностном теплообменнике.

Данные положительные отклонения объясняются тем, что в камере смешения струйного подогревателя происходит интенсивное дробление жидкой фазы паровым потоком, а последующее схлопывание паровых пузырьков при конденсации сопровождается интенсивными пульсациями давления и высокочастотными акустическими волнами, аналогичными ультразвуковому воздействию на воду [6]. При взаимодействии скоростного потока пара с водой размер образующихся капель находится на уровне $10-100$ мкм. Образование большого количества капель способствует выделению неконденсирующихся газов непосредственно в приемной камере струйного подогревателя. Данные газы впоследствии не конденсируются, а обособляются в относительно устойчивую газовую фазу, что и способствует более эффективному протеканию последующей деаэрации.

Также немаловажным фактором в случае применения струйных подогревателей для подогрева воды является их низкая удельная материалоемкость, которая для струйных подогревателей ПВС составляет всего $0,5-2,5$ кг на 1 т подогреваемой воды.

Таблица 1

**Типы и общие технические характеристики
щелевых деаэраторов КВАРК**

№ п/п	Наименование параметра	Значение для щелевых деаэраторов типов: В – вакуумного, А – атмосферного, П - повышенного давления		
		ДЩ(В)	ДЩ(А)	ДЩ(П)
1	Абсолютное рабочее давление, в рабочей зоне деаэратора, МПа абс	0,012-0,09	0,10-0,14	0,15-1,0
2	Диапазон номинальных расходов, т/ч (в скобках - для модификаций со встроенным охладителем выпара ДЩ(ОВС))	1-800 (1-400)	1-1200 (1-600)	80-500
3	Температура воды на входе в деаэратор ¹ , °С	50-99	100-109	110-180
4	Избыточное давление воды на входе в деаэратор ² , МПа изб	0,2-0,5	0,3-0,6	0,4-1,6
5	Нагрев воды в деаэраторе, °С	Отсутствует		
6	Содержание растворенного кислорода в деаэрированной воде на выходе из деаэратора, мкг/кг, не более: - при содержании кислорода в исходной воде на входе в деаэратор не более 13 мкг/кг; - при содержании кислорода в исходной воде на входе в деаэратор не более 1,0 мкг/кг;	50	20	Не нормируется ³
		50	20	10
7	Содержание свободной углекислоты в деаэрированной воде, мг/кг, не более: - при содержании свободной углекислоты в исходной воде на входе в деаэратор не более 20 мг/кг и бикарбонатной щелочности более 0,7 мг-экв/кг; - при содержании свободной углекислоты в исходной воде на входе в деаэратор не более 10 мг/кг и бикарбонатной щелочности более 0,4-0,7 мг-экв/кг; - при содержании свободной углекислоты в исходной воде на входе в деаэратор не более 5 мг/кг и бикарбонатной щелочности более 0,2-0,4 мг-экв/кг.	Отсутствует	Отсутствует	Не нормируется ⁴
		0,5	Отсутствует	Не нормируется ⁴
		Не нормируется	Отсутствует	Не нормируется ⁴
8	Удельный расход выпара ⁵ , на выходе из деаэратора, кг/т деаэрированной воды, не более ⁶ , мкг/кг	3,0-5,0	2,0-4,0	1,5-3,0
9	Диапазон изменения производительности деаэратора, % номинальной ⁷	40-120 ⁸		
10	Полный назначенный срок службы, лет, не менее	40		

¹ Температура воды на входе в деаэратор выбирается в пределах указанного диапазона значений.

² Избыточное давление воды на входе в деаэратор выбирается в пределах указанного диапазона значений.

³ Для деаэраторов промышленных котельных – 20 мкг/кг.

⁴ Для деаэраторов промышленных котельных – отсутствует.

⁵ Удельный расход выпара зависит от исходного содержания растворенных газов в деаэрируемой воде и требуемой глубины деаэрации.

⁶ Для деаэраторов модификации ДЩ(ОВС), имеющих встроенный охладитель выпара, расход выпара не нормируется.

⁷ Для минимального давления воды на входе в деаэратор. При увеличении давления диапазон изменения производительности увеличивается.

⁸ Для секционированных деаэраторов модификации ДЩ(С) диапазон изменения производительности составляет 20-120%. Для регулируемых деаэраторов модификации ДЩ(Р) диапазон изменения производительности составляет 10-120%. Обеспечение производительности более 100% от номинальной достигается за счет увеличения давления воды на входе в деаэратор.

В таблице 2 приведены результаты испытаний атмосферного щелевого деаэратора номинальной производительностью 50 т/ч, проведенные МПО «КВАРК» совместно с ОАО «Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт (ВТИ)»

Испытания проводились при расходах деаэрируемой воды $G = 10, 30, 50, 60$ т/ч, для каждого из которых температура воды менялась в диапазоне от 55 до 104°C. Давление воды на входе в деаэратор составляло 0,1-0,3 МПа. В таблице 1 приведены результаты испытаний в виде зависимостей остаточных концентраций кислорода, углекислоты и значений pH от температуры воды.

Таблица 2

Температура воды, °С	55	65	75	80	85	95	98	100	101	102	103	104	Прим.
Ост. конц. O ₂ , мкг/л	>100	>100	>100	>100	>100	80	50	45	35	25	20	<20	
Ост. конц. CO ₂ , мг/л	22	22	22	22	22	5	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.	Отс.	
pH	7	7	7,3	7,8	7,9	8,0	8,2	8,5	>8,5	>8,5	>8,5	>8,5	
				Динамическое равновесие			Своб. CO ₂ отсутствует		CO ₂ отсутствует Увеличение доли HCO ₃ ⁻				При pH > 8,5 своб. CO ₂ отс.
				2HCO ₃ ↔ CO ₃ ²⁻ + CO ₂ + 2H ₂ O					Наиболее благоприятная область рабочих температур				

Проведенные испытания показали, что в щелевом деаэраторе обеспечивается заданная степень деаэрации воды в полном соответствии с ГОСТ 16860-88 «Деаэраторы термические» без использования традиционных методов термической деаэрации, таких как подача пара в деаэрационную колонку и на барботажную ступень, организация противотока воды и пара и т.п. Во время работы деаэратора гидроударов, проскоков недеаэрированной воды, посторонних шумов, вибраций режимов захлебывания и влагуноса не зафиксировано.

На сегодняшний день на отопительных котельных, производственных ТЭЦ и станциях РАО ЕЭС во всех регионах РФ и странах СНГ работает более 500 щелевых деаэраторов КВАРК производительностью от 0,5 до 600 т/ч.

Более чем десятилетний опыт внедрения и эксплуатации атмосферных и вакуумных щелевых деаэраторов на промышленных и энергетических предприятиях показал высокую эффективность данного типа деаэраторов, их низкую эксплуатационную стоимость и высокую надежность, особенно при работе в переменных режимах.



Фото 1. Щелевой деаэратор КВАРК со встроенным струйным охладителем пара производительностью 300 т/ч.

В 2003-2005 гг. на рынке были представлены деаэраторы вихревого типа различных модификаций, которые, на первый взгляд, используют сходный со щелевым деаэратором принцип гидродинамической деаэрации. Однако сходным является только разделение стадий подогрева и

собственно деаэрации. Реализация механизма принудительной десорбции в вихревых деаэраторах имеет значительные отличия от деаэраторов щелевых.

В вихревых деаэраторах предварительно нагретая вода поступает в вертикальную либо горизонтальную цилиндрическую рабочую зону, где за счет тангенциального подвода либо завихрителя приобретает вращательное движение.

Из-за радиального градиента скорости давление в центральной части вихря снижается пропорционально квадрату скорости потока и становится ниже давления насыщения воды. [20], За счет термической десорбции и воздействия центробежных сил, растворенные пузырьки воздуха начинают диффундировать в направлении пониженного давления, образуя в центре рабочей зоны парогазовую полость. Далее выпар отсасывается вакуумным эжектором либо отводится в атмосферу.

Основное ограничение эффективности работы вихревых деаэраторов состоит в толщине обрабатываемого слоя воды, непосредственно влияющего на эффективность диффузионной десорбции [21].

В 1995-1996 гг. в МПО «КВАРК» были проведены исследования процессов массообмена в закрученных потоках воды. Были определены зависимости диффузионного критерия Nu для вращающихся слоев воды от числа Re , т.е. от скорости вращения и характерной толщины пристеночного слоя. В диапазоне радиусов закрутки потока от 0,02 до 0,3 м были установлены соотношения скоростей и толщин потока, необходимых для обеспечения эффективного газоудаления во всем сечении водяного слоя.

На основании этих исследований был разработан и запатентован *Циклонный деаэратор* [16], который, по сути, явился прототипом современного щелевого деаэратора КВАРК.

Принцип действия нынешних деаэраторов вихревого типа близок к циклонному деаэратору. Однако, поскольку характерный размер деаэрируемого слоя воды в вихревых деаэраторах превышает аналогичную величину для щелевых и циклонных деаэраторов в 5-30 раз, а скорость потока в вихревых соответственно до 10 раз ниже - это не позволяет реализовать двухфазный режим течения во всем объеме вращающегося слоя. Отсутствие одномоментного объемного вскипания деаэрируемой воды исключает наиболее эффективный десорбционный механизм турбулентной диффузии. Помимо этого, ламинарный пограничный слой, образующийся у стенки цилиндрической рабочей зоны при вращении потока, препятствует полному удалению растворенных газов из наиболее медленных пристеночных слоев.

По аналогии с традиционными деаэраторами, если в обычных деаэраторах для достижения теоретически максимальной глубины деаэрации требуется бесконечное время, то в деаэраторах типа вихревого – цилиндр бесконечной длины. Однако сколько-нибудь значительное увеличение длины рабочей зоны в таких деаэраторах невозможно в связи с диссипативными потерями на трение, гораздо более высокими в потенциальных течениях по сравнению с линейными потоками. Данные потери приводят к замедлению скорости вращения потока, схлопыванию парогазовой полости и захлебыванию деаэратора.

Аналогичный эффект возникает и при уменьшении давления на входе в вихревой деаэратор, т.е. при обычном регулировании его производительности. Поскольку расход несжимаемой среды через постоянное сечение пропорционален корню из перепада давления в этом сечении, очевидно, что при уменьшении расхода скорость потока также меняется в широком диапазоне. Падение скорости вращения потока приводит к уменьшению перепада между пристеночной и осевой зоной и резкому снижению эффективности газоудаления, а при дальнейшем уменьшении скорости – к схлопыванию полости выпара и захлебыванию деаэратора, что делает деаэраторы такого типа непригодными для эксплуатации в условиях переменной производительности.

В деаэраторе КВАРК данная проблема решается конструктивно за счет большого свободного объема рабочей зоны и организации встроенной пленочно-капельной ступени, эффективно работающей именно в режиме минимальных нагрузок. В регулируемой модификации деаэратора ДЩ(Р) рабочее сечение щелевого сопла изменяется автоматически в зависимости от текущей производительности, что позволяет деаэрировать воду в десятикратном диапазоне расходов при минимальном давлении на входе в деаэратор (0,1-0,15 МПа изб).

В деаэраторах вихревого типа свободный объем рабочей зоны отсутствует, и организация качественной деаэрации при снижении расхода деаэрируемой воды без одновременного изменения диаметра корпуса деаэратора весьма затруднительна.

Однако, как известно, прогресс не стоит на месте. Заданный компанией «КВАРК» в 90-х годах прошлого века высокий темп развития современной деаэрационной техники и технологии был поддержан другими инновационными научно-производственными компаниями. И это благоприятно сказывается на состоянии дел в отрасли, поскольку именно в жесткой конкуренции и рождаются лучшие технические решения.

Так что, вполне возможно, уже завтра появится деаэратор, использующий новый, высокоэффективный и до сих пор не применявшийся способ удаления из воды растворенных газов. В любом случае, реальный потребитель от этого только выиграет.

Литература

1. ГОСТ 16860-88. Деаэраторы термические. Типы, основные параметры, приемка, методы контроля. М.: Издательство стандартов, 1989г.
2. Громогласов А.А., Копылов А.С., Пильщиков А.П. Водоподготовка: Процессы и аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1990г.
3. Физические величины. Справочник. Под редакцией Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991г.
4. Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1990г.
5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. М.: Физматгиз, 1958г.
6. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М.: Энергоатомиздат, 1981г.
7. Мещеряков Н.Ф. Кондиционирующие и флотационные машины и аппараты. М.: Недра, 1990г.
8. Хорн Р. Морская химия (структура воды и химия гидросферы). Перевод с английского. М.: Мир, 1972г.
9. Пирсон И. Кавитация. М.: Мир, 1975г.
10. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Гидродинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981г.
11. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1995г.
12. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976г.
13. Оликер И.И. Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях. Л.: Изд-во литературы по строительству, 1972г.
14. Оликер И.И., Пермьяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. Л.: Энергия, 1971г.
15. Вихревой эффект и его применение в технике
16. Патент на изобретение № 2102329 (RU). МПК С 02 F 1/20. Циклонный деаэратор / Кувшинов О.М., Цыцаркин А.Ф. // Бюллетень изобретений №2, 1998г.
17. Патент на изобретение № 2112745 (RU). МПК С 02 F 1/20. Щелевой деаэратор / Кувшинов О.М., Цыцаркин А.Ф. // Бюллетень изобретений №16, 1998г.
18. Патент на изобретение № 2140616 (RU). МПК 6 F 28 С 3/00. Теплообменник смесительного типа / Кувшинов О.М., Цыцаркин А.Ф. // Бюллетень изобретений №30, 1999г.
19. Патент на изобретение № 2151990 (RU). МПК 7 F 28 С 3/06. Теплообменник / Кувшинов О.М., Цыцаркин А.Ф. // Бюллетень изобретений №18, 2000г.
20. Соколов В.И. Центрифугирование. М.:Химия, 1976.
21. Алимов Р.З., Седова Г.А.. Особенности турбулентного течения и теплообмена в кольцевых потоках вращающейся жидкости. УДК 532.542:536.248.2 // Вихревой эффект и его промышленное применение. Куйбышев: КуАИ, 1988.