

УДК 621.321

О МОДЕЛИРОВАНИИ ГАЗООБМЕНА В ПАРОВОДЯНОМ ТРАКТЕ ТЭС

ЖУКОВ В.П., д-р техн. наук, БАРОЧКИН Е.В., ВИНОГРАДОВ В.Н., кандидаты техн. наук,
ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В., асп., ШАТОВА И.А., инж.

Обоснована необходимость математического моделирования процессов газообмена в пароводяном тракте ТЭС. Показаны особенности моделирования процессов с участием химически активных и нейтральных газов. Приведены принципы составления моделей тепломассообмена на основе матричной формализации.

Ключевые слова: математическая модель, газообмен, тепломассообмен.

THE MODELING OF GASEOUS EXCHANGE IN WATER-STEAM CIRCUIT AT HEATING POWER PLANT

ZHUCKOV V.P., Ph.D., BAROCHKIN E.V., Ph.D., VINOGRADOV V.N., Ph.D.,
LEDUKHOVSKY G.V., postgraduate, SHATOVA I.A., eng.

The necessity of mathematical modeling of gaseous exchange in water-steam circuit at heating power plant is justified. The peculiarities of modeling of the processes with reactive and neutral gases are showed. The principles of heat-mass modeling on the basis of matrix formalization are stated.

Key words: mathematical model, gaseous exchange, heat-mass exchange.

На ТЭС в целях подавления внутренней коррозии, образования отложений накипи и шлама, в целях получения чистого пара реализуется комплекс мероприятий по ведению водно-химического режима (ВХР) пароводяного тракта. При этом на ТЭС с котлами докритических параметров используются восстановительные ВХР, с котлами сверхкритических параметров – окислительные ВХР. Восстановительные ВХР характеризуются тем, что в пароводяном тракте создаются химические восстановительные условия. Для этого производится глубокая деаэрация воды и дозировка реагентов, обладающих восстановительными свойствами. Гидразин связывает кислород и восстанавливает окислители, разлагается, в частности, с образованием аммиака. Дозируемый и образующийся при разложении гидразина аммиак нейтрализует слабые летучие кислоты и тем самым повышает pH воды, понижает активность катионов водорода, являющихся окислителями. Окислители (кислород, катионы водорода, нитриты, нитраты и другие соединения окислительного характера) участвуют в катодных реакциях, усиливая внутреннюю коррозию. Как правило, эта коррозия при эксплуатации оборудования ТЭС с котлами докритического давления протекает с диффузионным контролем катодных реакций. По этой причине на таких ТЭС рационально организовать восстановительный ВХР пароводяного тракта. Опыт свидетельствует, что одним из главных мероприятий по ведению восстановительного ВХР является деаэрация воды и конденсатов.

Окислительные ВХР реализуются лишь при использовании глубокообессоленных добавочной воды и турбинного конденсата энергоблоков сверхкритических параметров. Однако и в этом случае, несмотря на дозировку кислорода или воздуха в питательную воду, деаэрация воды и конденсатов необходима, так как обеспечивает удаление кислых летучих продуктов термолитиза из теплоносителя и затрудняющих теплообмен газов из зон конденсации пара. Таким образом, и в данном случае деаэрация является важным мероприятием при ведении ВХР.

Комплекс мероприятий по дегазации воды и конденсатов включает множество частных мероприятий. Их конкретный перечень зависит от вида

газа (кислород; свободные летучие кислоты, среди которых преобладает уголекислота; азот; аммиак; сероводород). Например, перечень мероприятий по снижению содержания кислорода в пароводяном тракте включает в себя: снижение присосов воздуха в вакуумных зонах тракта; деаэрацию добавочной и питательной воды, турбинного конденсата; эксплуатацию системы выпаров (сдувок газов) из зон конденсации пара и гидразинную обработку питательной воды. При этом конденсатор рассматривается как вакуумный деаэратор и признается, что присос воздуха в турбинный конденсат опаснее присоса воздуха в конденсирующийся пар. Присос охлаждающей воды в конденсаторах турбин является несущественным источником кислорода. Кислород расходуется в пароводяном тракте не только в реакциях с гидразином (при дозировке последнего), но и в процессах коррозии и окисления органических примесей воды. Однако вклад кислорода в эти процессы определить чрезвычайно трудно, так как при высоких температурах и вода проявляет окислительные свойства, по крайней мере, в отношении металла.

В перечень мероприятий по снижению содержания уголекислоты в пароводяном тракте ТЭС входят: известкование исходной воды; декарбонизация обрабатываемой воды; сильноосновное анионирование воды и перечисленные выше в отношении кислорода мероприятия. Дополнительно – амминирование воды и предотвращение поступления в тракт ТЭС органических веществ, в том числе нефтепродуктов, продуктов термолитиза сульфогля в блочных обессоливающих установках и пр.

Общим для всех газов мероприятием является сокращение потерь воды, пара и конденсатов.

Оценка эффективности перечисленных мероприятий требует составления материальных балансов для каждого газа с учетом массовых поступлений газа в тракт и вывода его из тракта.

Образцом работ по составлению газовых балансов пароводяного тракта ТЭС могут служить труды профессоров В.В. Герасимова, А.И. Касперовича, О.И. Мартыновой [1], работы П. Козна [2]. В указанных источниках рассмотрены балансы газов в радиоактивных контурах АЭС, являющихся в сравне-

нии с пароводяными трактами ТЭС менее сложными. Тем не менее опыт авторов [1, 2] весьма авторитетен и должен быть использован.

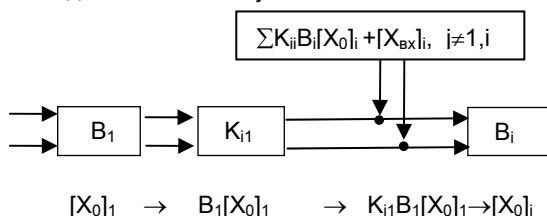
При составлении математической модели стационарного газообмена в тракте ТЭС необходимо иметь стационарные кинетические модели элементов тракта (конденсатора, подогревателей, деаэраторов и т.п.). В ряде случаев могут быть использованы авторские модели, например, модели деаэратора профессора В.И. Шарапова и сотрудников [3]. В других случаях эти модели должны быть составлены и апробированы. Трудность в проверке адекватности моделей заключается в недостаточной оснащенности тракта ТЭС проботборными устройствами. Облегчает выполнение задачи использование чувствительных переносных приборов: кислородомеров, водородомеров, кондуктометров и рН-метров.

В настоящее время нами проводится работа по изучению газообмена (в частности, процессов с участием кислорода, углекислоты, водорода) в пароводяных трактах ТЭС с целью разработки математических моделей, оценки эффективности мероприятий по снижению содержания вредных газов в тракте ТЭС и изучения процессов с участием этих газов.

Стационарные кинетические модели элементов пароводяного тракта разрабатываются на единой методологической основе – матричной формализации расчета сложных тепло- и массообменных установок, основные принципы которых изложены, например, в [4].

В большинстве случаев моделирование газообмена ведется совместно с моделированием теплообмена. В основу математического описания положены уравнения материального и энергетического балансов. Ниже приведены принципы составления математической модели на примере ступени смешивающего теплообмена.

Ступень теплообмена представлена четырехполосником с входными и выходными потоками для холодного и горячего теплоносителей. Составляется вектор признаков X из аддитивных параметров теплоносителей, значения которых можно складывать при смешении потоков. Такими параметрами являются, например, энергия и масса. В зависимости от решаемых задач набор параметров может варьироваться. Наиболее общий случай соединения ступеней предполагает возможность подачи на вход в i -й элемент потоков из всех остальных элементов. На рисунке схематично показано формирование потока на входе в i -й элемент установки.



Расчетная схема формирования потока на входе в i -й элемент установки

На вход в первый элемент подаются потоки холодного и горячего теплоносителя, которые характеризуются набором признаков $[X_{01}]$, индекс «0» внутри квадратных скобок указывает на входные параметры, индекс «1» за квадратными скобками относится к номеру ступени. Процесс теплообмена, массообмена

или их совместное протекание описывается матрицей процесса B , произведение которой на вектор входных параметров позволяет определить выходные параметры ступени $[X]_1 = B_1[X_0]_1$. Для указания направления движения потока после ступени формируется матрица коммутации K_{i1} , элементы которой показывают доли потока из первой ступени в i -ю. Матричное произведение $K_{i1}B_1[X_0]_1$ определяет параметры потока, подаваемого из первого элемента в i -й. Очевидно, что на вход в i -ю ступень могут подаваться потоки из остальных элементов схемы и внешние потоки. Входной вектор признаков для i -го элемента определится как сумма аддитивных характеристик смешиваемых на входе в него потоков:

$$[X_0]_i = K_{i1}B_1[X_0]_1 + K_{i2}B_2[X_0]_2 + \dots + K_{in}B_n[X_0]_n + [X_{вх}]_i, \quad (1)$$

где индекс «вх» указывает на внешний поток, подаваемый на вход ступени. Уравнения, аналогичные (1), записываются для каждой из n ступеней установки. Полученная система уравнений после преобразований представляется в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} -I & K_{12}B_2 & \dots & K_{1n}B_n \\ K_{21}B_1 & -I & \dots & K_{2n}B_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1}B_1 & K_{n2}B_2 & \dots & -I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [X_0]_1 \\ [X_0]_2 \\ \vdots \\ [X_0]_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[X_{вх}]_1 \\ -[X_{вх}]_2 \\ \vdots \\ -[X_{вх}]_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где I – единичная матрица.

При известных матрицах B и K решение системы (2) позволяет определить значение параметров теплоносителей в любой точке установки. При этом матрица коммутации K определяется при известных конструктивных характеристиках аппарата, а составление матрицы процесса B требует описания тепло-массообменных процессов внутри каждой ступени.

Аналогичным образом описываются процессы газообмена с участием газов, не участвующих в химических реакциях (например, процессы с участием кислорода в низкотемпературных элементах пароводяного тракта, где можно пренебречь участием кислорода в химических и электрохимических процессах).

Процесс газообмена с участием таких газов связан с незначительными массо- и энергопотоками, что позволяет рассматривать процессы теплообмена и газообмена последовательно. На первом этапе решается задача определения температур и расходов теплоносителей. Движущей силой газообмена является разность концентраций газа (например, разность его текущей и равновесной при данных условиях концентраций в воде). В качестве вектора параметров на втором этапе решения задачи выбираются концентрации газа в паровой фазе и воде:

$$[X] = \begin{pmatrix} C_{g1} \\ C_{g2} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где C_{g1} и C_{g2} – массовые концентрации газа, соответственно, в паре и воде.

Составление материальных газовых балансов приводит к получению матричного уравнения в виде

$$\begin{pmatrix} -G_{11} & K_{12}B_{2m}G_{22}B_2 & \cdots & K_{1n}B_{nm}G_{nn}B_n \\ K_{21}B_{1m}G_{11}B_1 & -G_{22} & \cdots & K_{2n}B_{nm}G_{nn}B_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1}B_{1m}G_{11}B_1 & K_{n2}B_{2m}G_{22}B_2 & \cdots & -G_{nn} \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} [X_0]_1 \\ [X_0]_2 \\ \vdots \\ [X_0]_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -[GX_{bx}]_1 \\ -[GX_{bx}]_2 \\ \vdots \\ -[GX_{bx}]_n \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $G_{ii} = \begin{pmatrix} G_{i1} & 0 \\ 0 & G_{2i} \end{pmatrix}$ – диагональная матрица расходов теплоносителей через ступень (G_1 и G_2 – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей); матрица $B_{im} = \begin{pmatrix} 1 - \Delta x_i & 0 \\ \Delta x_i & 1 \end{pmatrix}$ определяет изменение концентрации газа за счет смешения конденсата пара с водой (Δx_i – изменение степени сухости пара внутри ступени).

Матрица процесса деаэрации имеет вид

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где

$$b_{11} = \frac{a_{11}}{a_{11} + a_{22}} \left(\frac{a_{22}}{a_{11}} + e^{(a_{11}+a_{22})F} \right),$$

$$b_{12} = -\frac{a_{12}}{(a_{11} + a_{22})} (1 - e^{(a_{11}+a_{22})F}),$$

$$b_{21} = -\frac{a_{11}a_{22}}{a_{21}(a_{11} + a_{22})} (1 - e^{(a_{11}+a_{22})F}),$$

$$b_{22} = \frac{a_{11}}{a_{11} + a_{22}} \left(1 + \frac{a_{22}}{a_{11}} e^{(a_{11}+a_{22})F} \right),$$

$$a_{11} = -\frac{k_m}{G_1}, \quad a_{12} = \frac{k_m k_g}{G_1},$$

$$a_{21} = \frac{k_m}{G_2}, \quad a_{22} = -\frac{k_m k_g}{G_2},$$

Комплексы a_{ij} включают коэффициенты массопередачи и коэффициенты связи между концентрацией газа в воде и равновесной концентрацией газа в паровой фазе.

Решение системы (4) позволяет определить концентрации газа внутри установки.

Наибольшие трудности при решении конкретной задачи вызывает поиск коэффициентов тепло- и массопередачи, коэффициента связи между текущей концентрацией газа в воде и равновесной концентрацией газа в паровой фазе, а также эффективной поверхности теплообмена.

При этом могут быть приняты два пути, первый из которых требует решения частных задач теплообмена и гидродинамики и связан на практике со значительными трудностями. Достаточно упомянуть сложные случаи конденсации паровых смесей на трубных пучках и струях воды (например, в конденсаторах паровых турбин или в деаэраторах), моделирование теплообмена в которых связано с расчетом течения пленки конденсата [5].

Второй путь предполагает нахождение значений указанных величин как параметров идентификации математической модели по результатам серии соответствующих экспериментов на натурном оборудовании. Ясно, что первый путь является более предпочтительным, поскольку позволяет изучить физико-химические условия протекания процессов и тем самым распространить полученные характеристики на смежные процессы и оборудование.

Поэтапное решение задачи газообмена в конкретном элементе пароводяного тракта позволяет использовать некоторые из уже существующих моделей теплообмена. Так, например, математическая модель процессов теплообмена в испарительных установках башенного типа, разработанная в кандидатской диссертации А.А. Мошкарин [6], может быть расширена до модели газообмена.

Учет химических взаимодействий (например, процессов разложения бикарбонатов при моделировании газообмена с участием углекислоты) значительно усложняет модели, однако хорошо интегрируется в разработанный метод описания теплообмена.

Результаты работы уже использованы нами при наладке ВХР ряда ТЭЦ, в частности, ТЭЦ-ПВС-1 и ТЭЦ-ЭВС-2 ОАО «Северсталь».

Заключение

1. Для оценки эффективности мероприятий, направленных на снижение содержания в водах и парах ТЭС вредных газов, необходимо составление материальных балансов для каждого конкретного газа.

2. При составлении математической модели стационарного газообмена в тракте ТЭС необходимо иметь стационарные кинетические модели элементов тракта.

3. В качестве базы для составления стационарных кинетических моделей элементов пароводяного тракта может быть принята матричная формализация расчета сложных тепло- и массообменных установок.

4. Подходы к моделированию процессов газообмена с участием химически активных и нейтральных газов при составлении газовых балансов имеют принципиальные отличия.

Список литературы

1. Герасимов В.В., Касперович А.И., Мартынова О.И. Водный режим атомных электростанций. – М.: Атомиздат, 1976. – 400 с.
2. Коэн П. Технология воды энергетических реакторов. – М.: Атомиздат, 1973. – 328 с.
3. Шарипов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы // Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 560 с.
4. Барочкин Е.В., Жуков В.П., Ледуховский Г.В. Моделирование теплообмена в смешивающих подогревателях со сложной конфигурацией потоков // Известия вузов: Химия и химическая технология. – 2004. – Т. 47. – Вып. 4.
5. Mitrovic J., Gneiting R. Kondensation von Dampfgemischen // Brennstoff Wdrme Kraft. – 1996. – № 1/2. – S. 78–79.
6. Мошкарин А.А. Совершенствование схем испарительных установок ТЭС: Дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2006.