

К вопросу о растворимости рабочего газа системы компенсации объема (КО) теплоносителя первого контура паропроизводящих установок (ППУ) с водо-водяным реактором (ВВЭР)

В. С. СЫСОВЕВ

УДК 621.039.5:629.1

В настоящее время имеется мало данных по растворимости газов в воде при параметрах первого контура ППУ с ВВЭР.

Опубликованные работы [1—4] базируются на относительно небольшом экспериментальном материале. Данные о растворимости водорода, гелия, азота и кислорода в воде недостаточно систематизированы, чтобы служить основанием для количественных обобщений.

Растворимость газа в зависимости от его парциального давления при постоянной температуре количественно, если известен коэффициент Генри (или Бунзена), определяется законом Генри. В вопросе о влиянии температуры на растворимость при высоких давлениях мнения некоторых авторов прямо противоположны [2, 4, 5].

В работе [4] экспериментально исследованы растворимости газов (Н, Не, N₂ и O₂) при температурах до 371°С и давлениях 7—42 кгс/см². Однако полученные данные могут быть использованы для оценки растворимости рабочего газа КО в теплоносителе первого контура только после определенной доработки.

Результаты этих экспериментов приведены в работах [4, 6] в виде графических зависимостей:

$$S_p = \Phi_1(p_r)_{T=\text{const}} \frac{\text{н.м.л. газа}}{\text{г H}_2\text{O}};$$

$$S_T = \Phi_2(T)_{p_r=\text{const}} \frac{\text{н.м.л. газа}}{\text{г H}_2\text{O}},$$

где S_p — равновесная концентрация в зависимости от парциального давления испытываемого газа; S_T — равновесная концентрация испытываемого газа в зависимости от температуры раствора; p_r — парциальное давление газа; T — температура раствора.

Отборы проб проводились в специальном вращающемся автоклаве при термодинамическом равновесии между раствором и газом. В каждой пробе измерялось предельное количество растворенного газа $\left[\frac{\text{н.м.л. газа}}{\text{г H}_2\text{O}} \right]$ при определенном парциальном давлении и постоянной температуре раствора.

На рис. 1 и 2 построены графики равновесной концентрации азота и кислорода в зависимости от температуры и парциального давления, а также степени недогрева воды до насыщения $\Delta t_{\text{н}}$. Делается вывод, что «... растворимость исследуемых газов увеличивает-

ся с ростом температуры, тогда как считалось что она уменьшается». Полученная зависимость $S_T = \Phi_2(T) p_r = \text{const}$ не может быть непосредственно использована для оценки растворимости рабочего газа в теплоносителе первого контура ППУ с ВВЭР, так как теплоноситель с различной температурой в любой

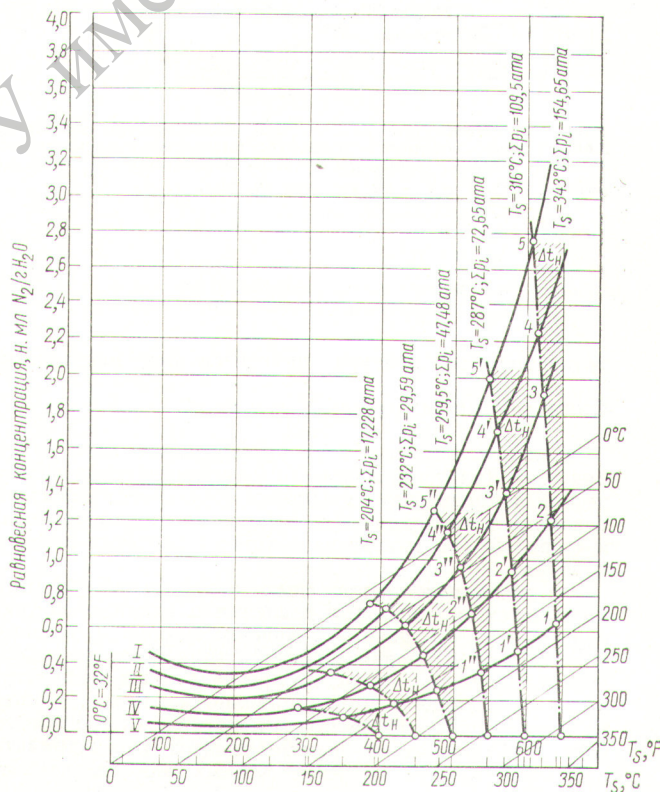


Рис. 1. Изменение равновесной концентрации азота в воде от температуры и парциального давления, а также степени недогрева воды до насыщения $\Delta t_{\text{н}}$ (данные работы [4]):

I — 35,15 кгс/см²; II — 28,12 кгс/см²; III — 21,09 кгс/см²; IV — 14,06 кгс/см²; V — 7,03 кгс/см².

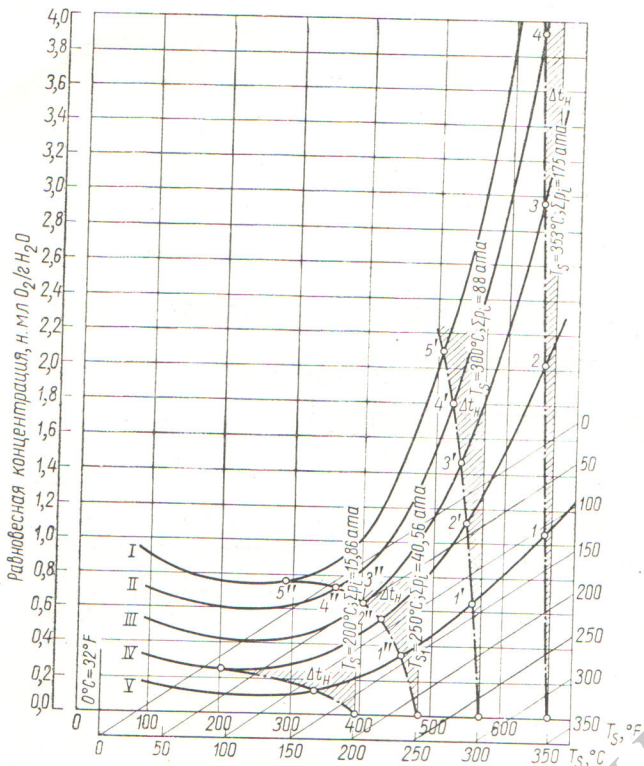


Рис. 2. Изменение равновесной концентрации кислорода в воде в зависимости от температуры и парциального давления, а также степени недогрева до насыщения Δt_H (данные работы [4]). 1 — V — то же, что на рис. 1.

точке первого контура находится под постоянным общим давлением: $p_{Ik} = \sum_{i=1}^n p_i = \text{const.}$

При неизменном объеме растворенного газа (закон Генри — Дальтона) масса его (соответствующая равновесной концентрации) в единице объема теплоносителя различна в «холодной» (на выходе из парогенератора) и «горячей» (на выходе из реактора) полостях первого контура.

Условия проведения опыта и измерений [4] (при постоянном парциальном давлении и одинаковой температуре в автоклаве — в каждом замере) и условия работы системы первого контура (при постоянном общем давлении $p_{Ik} = \text{const.}$, но при различных температурах теплоносителя) принципиально различны. Поэтому вывод в работе [4] не может носить характера общего закона. Приведенные данные следует рассматривать как совокупность опытных данных, представленных в графической форме.

Чтобы использовать данные работы [4] для оценки растворимости газа в теплоносителе первого контура ППУ с ГКО, необходимо рассмотреть изменение равновесной концентрации данного газа в зависимости от степени недогрева Δt_H раствора до температуры насы-

щения T_s при данном общем давлении над раствором:

$$P_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^2 p_i = p_s + p_{\Gamma} = \text{const};$$

$$T_s = \text{const},$$

где p_s — давление насыщенного пара теплоносителя при температуре T_i .

Отмечая значения равновесных концентраций, соответствующих степени недогрева Δt_H при данном парциальном давлении $p_{\Gamma i}$ до принятой температуры насыщения T_{si} , цифрами 1, 2, ... (до $T'_{si} = 1', 2', \dots$) и соединяя отмеченные точки — штрих-пунктирные кривые на графиках рис. 1 и 2 — получаем семейство кривых с вершинами на оси абсцисс.

Отрезок абсциссы, ограниченный принятой ординатой T_{si} и любой точкой построенной кривой с вершиной в этой точке, численно равен степени недогрева Δt_H в данной области раствора.

Соответствующее этой абсциссе значение ординаты покажет численное значение равновесной концентрации данного газа в заданной области раствора с температурой $T_i \leq T_s$.

Анализ полученного семейства кривых показывает, что равновесная концентрация газов (N_2 и O_2) в воде при постоянном общем давлении над раствором прямо пропорциональна степени недогрева Δt_H раствора до температуры насыщения T_s при данном давлении $P_{\text{общ}}$ и стремится к нулю при $\Delta t_H \rightarrow 0$, т. е. в случае кипения газ в растворе находиться не может [2, 5].

Пользуясь кривыми растворимости $S = \Phi_3(\Delta t) T_{si}$ можно определить предельную концентрацию рабочего газа N_2 системы КО в теплоносителе первого контура для заданных значений температур. На графике должна быть нанесена ордината $T_s = \text{const}$ и по четырем-пяти «узловым» точкам построена кривая растворимости газа в зависимости от $\Delta t_H = \Phi_4(p_{\Gamma})$.

Применительно к условиям работы системы первого контура ППУ с ГКО можно сделать следующий вывод:

Максимальное количество растворенного рабочего газа имеет относительно «холодный» теплоноситель в системе КО ($T_{K0} = 180 \div 200^\circ \text{C}$, $\Delta t_H = 150 \div 170^\circ \text{C}$).

Попадая в «горячий» полости системы первого контура — реактор, парогенератор, ГЦЭН ($T_{Ik} = 280 \div 320^\circ \text{C}$, $\Delta t_H = 75 \div 30^\circ \text{C}$) — растворенный рабочий газ выделяется в свободном состоянии. Процесс выделения рабочего газа может быть предотвращен при выполнении условия $T_{Ik} \leq T_{K0}$.

Поступило в Редакцию 25/VII 1968 г.
В окончательной редакции 18/XII 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Г. Еремина. Растворимость одноатомных газов и азота. Л., Изд. ЛГУ, 1950.
2. В. И. Касаточкин, А. Г. Пасынский. Физическая и коллоидная химия. М., Медгиз, 1960.
3. А. Ю. Н а м и о т. «Ж. физ. химии», XXXIV, 1593 (1960).
4. H. P r a y et al. Industr. and Engng Chem., 44, 1146 (1952).
5. Л. Д. Л а н д а у, А. И. А х и е з е р, Е. М. Л и ф ш и ц. Курс общей физики. М., «Наука», 1965.
6. Н. М. С и н е в, П. М. У д о в и ч е н к о. Герметические водяные насосы атомных энергетических установок. М., Атомиздат, 1967.