



Научно-исследовательский институт
атомных реакторов им. В.И.Вейса

П-22(288)

В.П.Петухов, А.С.Мазанов

РАСЧЕТНОЕ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ
СТОЙКОСТИ СТАЛИ IX18N9T
В ЗОНЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
НАТРИЯ С ВОДОЙ

ядерные
реакторы

Дмитровград · 1976

НАСТОЯЩЕЕ ИЗДАНИЕ НИИАР

ЯВЛЯЕТСЯ самостоятельной, не всегда дублирующей в последствии в других изданиях ПУБЛИКАЦИЕЙ отдельных оригинальных научных трудов НИИАР, на которую можно ссылаться в других публикациях, указывая при этом авторов, наименование, порядковый номер (НИИАР, П-...), год и место издания (Димитровград).

ИЗДАЕТСЯ с целью более быстрой или более полной информации по сериям:

1. Ядерные реакторы
2. Методика и техника облучения
3. Радиационное материаловедение
4. Радиохимия
5. Ядерная физика
6. Ядерная электроника
7. Вычислительная математика
8. Информатика и управление

ПЕЧАТАЕТСЯ на ротатипите НИИАР тиражом 150 экз.

РАССЫЛАЕТСЯ в научные организации, научно - технические библиотеки и отдельным лицам на основе обмена и за плату.

Научно-исследовательский институт атомных реакторов
им. В.И.Ленина

НИИАР П-22 (288)

В.П.Петухов, А.С.Мазанов

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СТОЙКОСТИ СТАЛИ ІХІ8НУТ В ЗОНЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
НАТРИЯ С ВОДОЙ

Димитровград
1976

УДК 521.039.25

Р е ф е р а т

Изложена методика расчета поля температур, концентраций и скоростей в зоне взаимодействия натрия с водой. Приводятся результаты расчета скорости разрушения стали IX18N9T в предположении, что разрушение носит в основном коррозионный характер.

Сравниваются результаты расчета с экспериментальными данными по температуре в зоне взаимодействия, профилю и скорости разрушения стали в этой зоне. Отмечено хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом.

I. ВВЕДЕНИЕ

В связи с разработкой и строительством энергетических установок с реакторами на быстрых нейтронах в настоящее время уделяется серьезное внимание исследованию работы парогенераторов натрий-вода. Значительную роль в этих исследованиях играет изучение аварийных режимов, связанных с разгерметизацией трубного пучка парогенератора. Многочисленные экспериментальные исследования взаимодействия натрия с водой, возникающего при разуплотнении трубного пучка, указывают на большую опасность этого явления как для трубок, соседних с дефектной, так и для всей конструкции парогенератора.

Большое число факторов, влияющих на результаты взаимодействия (параметры натрия и воды, режим течения натрия, место образования течи, конструктивные особенности парогенератора, форма и величина образовавшегося отверстия, материал трубок и т.д.), сильно затрудняет экспериментальные исследования и делает их результаты практически не сопоставимыми, т.к. опыты проводятся в разных условиях, а зависимость результатов эксперимента от исходных данных в большинстве случаев неизвестна. По-видимому, в связи с этим в настоящее время возникает необходимость максимального приближения опытной модели к реальному парогенератору и проведения экспериментов на моделях мощностью 30-50 и в ближайшем будущем, видимо, до 70 МВт.

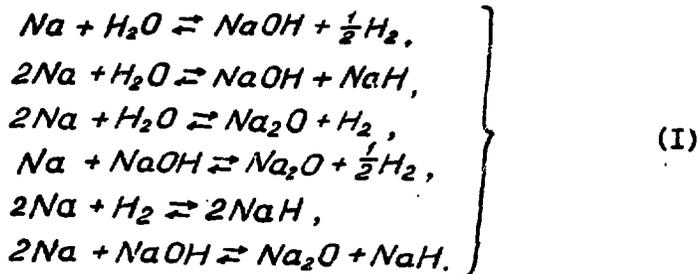
Подобные эксперименты требуют длительной подготовки, и стоимость их чрезвычайно велика, в то время как объем получаемой информации такой же, как и на малых моделях.

Поэтому актуальным является расчетное исследование процесса взаимодействия и создание его математической модели, позволяющей как переносить результаты эксперимента с одних условий на другие, так и вообще отказаться от экспериментов при достаточном совершенстве расчетной методики.

В данной работе изложена разработанная авторами методика расчета взаимодействия при малых течах воды в натрий, и сравниваются результаты расчета с экспериментальными данными.

2. РЕАКЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАТРИЯ С ВОДОЙ

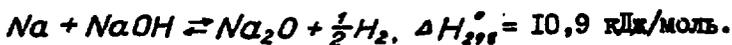
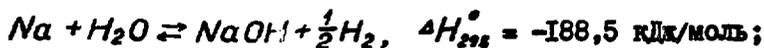
Попадание воды или водяного пара в натрий сопровождается следующими химическими реакциями [1]:



Экспериментальные данные показывают, что область интенсивного разрушения конструкционных материалов в зоне взаимодействия имеет длину 200–300 диаметров отверстия. Ниже будет показано, что скорости потока в этой зоне составляют сотни метров в секунду, т.е. время пребывания в ней реагентов при малых течах не может превышать десятков миллисекунд. В связи с этим в формировании характеристик зоны интенсивного разрушения конструкционных материалов основную роль будут играть наиболее быстрые реакции системы (I). Скорость трехмолекулярных реакций, как правило, значительно меньше, чем у двухмолекулярных, т.к. вероят-

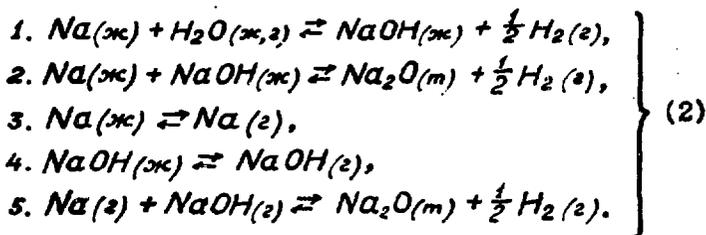
ность столкновения молекул резко падает с ростом числа молекул, участвующих в столкновении [2].

Исключив из системы (I) все трехмолекулярные реакции, получим



Большой тепловой эффект первой из этих реакций приводит к повышению температуры выше температуры кипения щелочи [3]. Вследствие этого в зоне реакции образуются пары натрия и щелочи, между которыми также возможно химическое взаимодействие.

Таким образом, начальный этап взаимодействия натрия с водой можно описать следующей системой реакций:



3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Поля температур, концентраций и скоростей в зоне взаимодействия натрия с водой будут определяться закономерностями турбулентного переноса тепла, массы и импульса в системе, состоящей из 7 компонентов: $Na(ж)$, $H_2O(г)$, $NaOH(ж)$, $H_2(г)$, $Na_2O(т)$, $Na(г)$, $NaOH(г)$, между которыми возможны 5 химических реакций (2).

Запишем систему дифференциальных уравнений, описывающих процесс взаимодействия:

$$\left. \begin{aligned}
 \rho \frac{dC_k}{d\tau} &= \operatorname{div} \vec{J}_k + \sum_{j=1}^5 \nu_{kj} J_j, \\
 \rho \frac{dH}{d\tau} &= \operatorname{div} \vec{J}_q - \sum_{k=1}^7 H_k \sum_{j=1}^5 \nu_{kj} J_j, \\
 \rho \frac{d\vec{V}}{d\tau} &= -\operatorname{grad} p + \operatorname{div} \vec{J}_v, \\
 \frac{d\vec{V}}{d\tau} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}) &= 0.
 \end{aligned} \right\} (3)$$

Здесь

- ρ - плотность;
- C_k - концентрация компонента k ;
- H - энтальпия смеси;
- $\vec{J}_k, \vec{J}_q, \vec{J}_v$ - диффузионные потоки соответственно вещества, тепла и импульса;
- ν_{kj} - массовый стехиометрический коэффициент компонента k в реакции j ;
- J_j - скорость реакции j ;
- \vec{V} - вектор скорости потока;
- p - давление;
- τ - время.

Воспользовавшись гипотезой Прандтля о постоянстве коэффициентов турбулентного переноса по сечению струи [4], легко получить

$$A_v = \sigma \sqrt{\rho J_0},$$

где

- σ - экспериментальный коэффициент;
- J_0 - начальный импульс струи.

Учитывая, что процессы тепло- и массопереноса подобны, и предположив, что так же, как и в нереагирующих струях [5], коэффициент турбулентного переноса тепла A_q

вдвое превышает A_v , получим

$$A_k = A_g = 2A_v.$$

Вводя новые функции $\theta_k = \frac{E_k - E_{k\infty}}{E_{k0} - E_{k\infty}}$ и $\xi = \frac{h - h_\infty}{h_0 - h_\infty}$,

где $E_k = \sum_{j=1}^5 (\nu_{kj} C_k - \nu_{kj} C_j)$, $h = H + \sum_{k=1}^5 H_k C_k$,

индекс ∞ соответствует невозмущенному натрию, а индекс 0 - воде (пару) в точке истечения, получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta_k}{d\tau} &= 2\nu\nabla^2\theta_k, \\ \frac{d\xi}{d\tau} &= 2\nu\nabla^2\xi, \\ \frac{d\vec{V}}{d\tau} &= -\frac{1}{\rho}g\alpha d\rho + \nu\nabla^2\vec{V}, \\ \frac{d\vec{V}}{d\tau} + \text{div}(\rho\vec{V}) &= 0, \quad -\nu = \sigma\gamma\sqrt{\sigma_0/\rho}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В этой системе уравнения для θ_k и ξ подобны, кроме того, граничные условия для этих величин тождественны:

$$\theta_k(0) = \xi(0) = 1, \quad \theta_k(\infty) = \xi(\infty) = 0.$$

Подобие уравнений и тождественность граничных условий указывают на тождественность решений, т.е. во всей зоне взаимодействия $\theta_k \equiv \xi$. В связи с этим решение задачи взаимодействия сводится к рассмотрению последних трех уравнений системы (4), которые аналогичны системе уравнений переноса для ламинарного потока не реагирующей жидкости.

4. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

4.1. Истечение из круглого отверстия

В случае стационарного истечения воды из круглого отверстия радиусом R_0 зона взаимодействия будет осесимметричной, т.е. её параметры будут определяться только безразмер-

ным радиусом z/R_0 и расстоянием x/R_0 от места течи. Без ограничения общности можно положить $R_0 = 1$. При этом уравнения взаимодействия

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} &= 2v \frac{1}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} \right), \\ u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{1}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial U}{\partial z} \right) \\ \operatorname{div}(\vec{V}) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

тождественны уравнениям ламинарного пограничного слоя.

В работе [4] приводится решение уравнений движения ламинарной осесимметричной струи (последние два уравнения системы (5)):

$$\left. \begin{aligned} U &= \frac{2\alpha^2}{x} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4}\alpha^2 \rho^2\right)^2}, \\ v &= \frac{\alpha \sqrt{v}}{x} \cdot \frac{2\rho \left(1 - \frac{1}{4}\alpha^2 \rho^2\right)}{\left(1 + \frac{1}{4}\alpha^2 \rho^2\right)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Легко показать, что решением первого уравнения системы (5) будет функция

$$\mathcal{E} = \frac{\alpha m \sqrt{2}}{x} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{4}\alpha^2 \rho^2}, \quad (7)$$

где $\rho = z/x\sqrt{v}$, α и m — константы интегрирования, определяемые из законов сохранения импульса

$$J_0 = 2\pi \int_0^{\infty} \rho U^2 z dz$$

и обобщенной энтальпии

$$J_0 = 2\pi U_0 \int_0^{\infty} \rho U \mathcal{E} z dz.$$

Предположив, что плотность зоны взаимодействия является функцией только x , и определив среднее по радиусу значение плотности как отношение массы жидкости, проходящей через поперечное сечение зоны взаимодействия в единицу

времени, к её объему, легко получить

$$\alpha = \sqrt{\frac{3 \gamma_0}{16 \pi \nu \rho}}, \quad \Delta m = \gamma_0 / 2 \sqrt{2} \pi \nu \alpha_0 \rho.$$

4.2. Истечение из отверстия произвольной формы

При разгерметизации парогенератора трудно ожидать образования круглого отверстия. В полярных координатах форма реального отверстия всегда может быть описана выражением $\bar{z} = z \alpha(\varphi)$.

Для определенности примем, что $\alpha(\varphi)$ — однозначная функция φ . В координатах \bar{z}, φ отверстие будет круглым, а дифференциальные уравнения взаимодействия запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\nu}{H_1} \frac{\partial E}{\partial \bar{z}} &= \frac{2\nu}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\frac{H_2}{H_1} \frac{\partial E}{\partial \bar{z}} \right), \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\nu}{H_1} \frac{\partial u}{\partial \bar{z}} &= \frac{\nu}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\frac{H_2}{H_1} \frac{\partial u}{\partial \bar{z}} \right), \\ \frac{\partial}{\partial \bar{z}} (\rho \nu H_2) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u H_1 H_2) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где коэффициенты Ляме

$$H_1 = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial \bar{z}} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \bar{z}} \right)^2} = 1,$$

$$H_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial \varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \varphi} \right)^2} = z \sqrt{a^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial \varphi} \right)^2} = z \alpha_1.$$

Подставив эти значения в систему (8), получим систему уравнений, тождественную системе (5), следовательно, решения (6) и (7) применимы и для отверстий произвольной формы, если в них заменить z на $z \alpha_1$.

Тогда интегральные условия запишем в виде

$$I_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho U^2 z a, d\varphi d\bar{z} = \int_0^{2\pi} a a_1 d\varphi \int_0^{\infty} \rho U^2 z dz,$$

$$I_0 = U_0 \int_0^{2\pi} a a_1 d\varphi \int_0^{\infty} \rho U z dz,$$

а константы интегрирования

$$L = (3 I_0 / 8 \Delta \nu \rho)^{0.5}, \quad Lm = I_0 / (\sqrt{2} \Delta \nu U_0 \rho), \quad \text{где } \Delta = \int_0^{2\pi} a a_1 d\varphi.$$

Сравнивая эти выражения с константами интегрирования для круглого отверстия и учитывая формулы (6), (7), найдем отношение длины круглой струи к длине струи произвольной формы:

$$\frac{L_c}{L} = 2\pi / \int_0^{2\pi} a a_1 d\varphi. \quad (9)$$

Если проходные сечения отверстий равны, т.е.

$\pi R_0^2 = \int_0^{2\pi} a a_1 z d\varphi$, то отношение (9) является отношением периметров отверстий, т.е. длина зоны взаимодействия обратно пропорциональна периметру отверстия. Поскольку периметр круглого отверстия всегда меньше периметра любого другого отверстия той же площади, круглая струя будет иметь наибольшую длину. В этом смысле круглые отверстия наиболее опасны для парогенератора. На рис. I показана зависимость длины зоны взаимодействия вблизи прямоугольного отверстия от отношения его сторон.

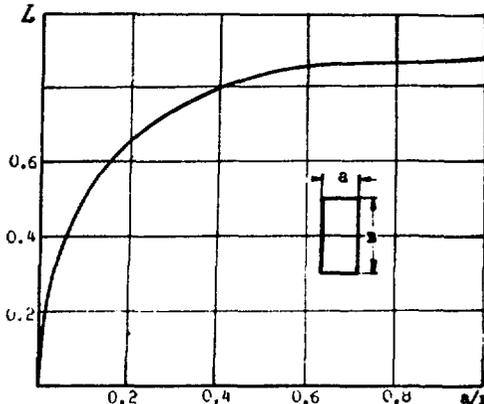


Рис. I. Зависимость длины зоны взаимодействия, образующейся вблизи прямоугольного отверстия, от отношения его сторон

5. ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР, КОНЦЕНТРАЦИЙ И СКОРОСТЕЙ В ЗОНЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАТРИЯ С ВОДОЙ

Зная величину $\bar{\epsilon}(\alpha, z)$ и осуществляя обратное преобразование от $\bar{\epsilon}$ к концентрациям, можно найти

$$C_{\kappa} = \frac{1}{\sum_{j=1}^5 \nu_j} \left[C_1 \sum_{j=1}^5 \nu_{\kappa j} + \bar{\epsilon}(\bar{\epsilon}_{\kappa+} - \bar{\epsilon}_{\kappa-}) + \bar{\epsilon}_{\kappa-} \right] \quad (10)$$

Для вычисления по этой формуле необходимо знать величину C_1 , точное значение которой определяется решением первого уравнения системы (3), которое в данном случае можно записать

$$u \frac{\partial C_1}{\partial x} + v \frac{\partial C_1}{\partial z} = \frac{2\nu}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial C_1}{\partial z} \right) - 23(\gamma_1 + \gamma_3 + \gamma_5) \quad (11)$$

Скорости реакций γ_1 , γ_3 и γ_5 , входящие в уравнение (11), неизвестны, поэтому решение его в настоящее время найти невозможно, однако наличие этого уравнения позволяет все-таки определить C_1 путем следующих рассуждений.

Согласно закону действующих масс $\gamma_j = K C_1 C_2$.

Как известно, взаимодействия натрия с водой носят взрывной характер, т.е. константа скорости этой реакции K очень велика. В то же время у конвективных и диффузионных членов уравнения (11) нет никаких оснований быть существенно большими, чем в не реагирующих турбулентных струях, т.е. произведение

$$C_1 C_2 = \left[\frac{2\nu}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial C_1}{\partial z} \right) - \left(u \frac{\partial C_1}{\partial x} + v \frac{\partial C_1}{\partial z} \right) - 23(\gamma_3 + \gamma_5) \right] / 23K \quad (12)$$

при больших K должно быть малой величиной (возможные большие значения констант скоростей реакций 3 и 5 не могут изменить положения, т.к. в формуле (12) выражение, стоящее в квадратной скобке, должно быть положительным). Примем для определенности $K = \infty$, т.е. предположим, что скорость взаимодействия натрия с водой определяется только скоростью их перемешивания.

Из равенства (12) при $K = \infty$ следует, что $C_1 C_2 = 0$. Выполнение этого условия возможно в трех случаях:

1. $C_1 = 0, C_2 \neq 0$; 2. $C_1 = 0, C_2 = 0$; 3. $C_1 \neq 0, C_2 = 0$.

С точки зрения физической картины процесса очевидно, что при бесконечной скорости реакции концентрация вещества, находящегося в недостатке, должна быть равна нулю. Вещества, находящиеся в стехиометрическом соотношении, полностью прореагируют и концентрация их будет равна нулю.

Таким образом, равенство $C_1 = C_2 = 0$, которое с учетом выражения (10) можно переписать в виде

$$(41\xi - 18)/23 = 1 - 41\xi/18 = 0,$$

является уравнением стехиометрической поверхности. Выполняется это равенство при $\xi = 18/41$, т.е. на поверхности

$$\xi = \frac{18}{41} = \frac{dm\sqrt{2}}{x} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{4}d^2\eta^2}$$

концентрации натрия и воды равны нулю.

Внутри этой поверхности ($\xi > 18/41$)

$$C_1 = 0; C_2 = (41\xi - 18)/23; C_3 = 40(1 - \xi)/23; C_4 = 1 - C_2 - C_3.$$

С внешней стороны поверхности ($\xi < 18/41$)

$$C_1 = 1 - \frac{41}{18}\xi; C_2 = 0; C_3 = \frac{40}{18}\xi; C_4 = 1 - C_3 - C_3.$$

Определение подобным образом концентраций C_1, \dots, C_4 исключает из рассмотрения реакции 2-5 системы (2), что допустимо только в том случае, когда величина C_5 незначительна, т.е. образование окиси натрия не влияет заметным образом на концентрацию остальных веществ. Значение C_5 определяется в этом случае уравнением

$$\rho \frac{dC_5}{dt} = \text{div } \vec{J}_5 + \delta_2 (J_2 + J_5). \quad (13)$$

По данным работы [6] реакция 2 в условиях натриевого контура идет в кинетической области; естественно, что в зоне взаимодействия, где интенсивность массопереноса значительно выше, скорость взаимодействия натрия со щелочью также будет определяться скоростью химической реакции. Скорость реакции J_5 будет иметь тот же порядок, что и J_2 , т.к. во взаимодействии участвуют те же вещества.

Легко показать, что при протекании реакций 2 и 5 в

кинетической области решением уравнения (13) будет функция

$$C_5 = \int_0^{x^*} \frac{J}{U} dx - \int_0^{\infty} \frac{J}{U} dx \left(1 - \frac{x^*}{x} \cdot \frac{1}{1 + \frac{d^2}{4} \rho^2} \right),$$

где $J = J_2 + J_5$;

x^* - минимальное значение x , при котором C_5 отлично от 0.

$$x^* = \frac{2}{\alpha} \sqrt{\frac{d^2}{4} \rho^2 x \left[x + \frac{d^2}{4} \rho^2 (x^2 - x) \right]}.$$

Переходя от ξ к обобщенной энтальпии, получим

$$h = \xi (i_0 - H_2 - i_1) + i_1 = t \sum_{k=1}^7 C_{pk} + \sum_{k=1}^7 C_k H_k, \quad (14)$$

где

i_0 - энтальпия пароводяной смеси на выходе из отверстия;

H_2 - теплота образования воды;

i_1 - энтальпия натрия за пределами зоны взаимодействия;

t - температура в зоне взаимодействия;

C_{pk} - теплоемкость компонента k .

Решая уравнение (14) относительно t , получим

$$t = \frac{1}{\sum_{k=1}^7 C_{pk} C_k} \left[\xi (i_0 - H_2 - i_1) + i_1 - \sum_{k=1}^7 C_k H_k \right].$$

Таким образом, найдена зависимость температуры и концентраций от ξ . Для вычисления ξ необходимо знать величину экспериментальной константы σ , входящей в формулу для коэффициента турбулентной вязкости ν .

Для определения σ воспользуемся результатами измерения температуры на оси зоны взаимодействия. Эксперименты проводились на статическом стенде, описанном в работе [7]. В этих экспериментах хромель-алюмелевая термопара в нержавеющей чехле диаметром 0,8 мм устанавливалась на расстоянии $x/R_0 = 60, 120$ и 200 от места впрыска в натрий сухого насыщенного пара с давлением $9 \cdot 10^6$ Па. Пар подавался через круглое отверстие диаметром 0,5-0,8 мм. Температура натрия перед началом подачи пара 500°C .

На рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные значения температур. Наилучшее совпадение результатов расчета с экспериментом наблюдается при $\delta = 0,01$.

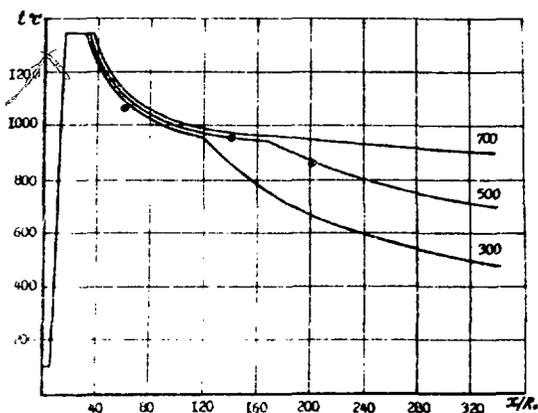


Рис. 2. Температура на оси зоны взаимодействия (цифрами показана температура натрия за пределами зоны взаимодействия)

Максимальное расхождение между расчетом и экспериментом составляет 36°C при температуре в зоне взаимодействия 1100°C и $x/z = 60$. Объяснить это расхождение можно тем, что при малых расстояниях от места течи велики радиальные градиенты температуры, и термопара диаметром 0,8 мм при диаметре отверстия 0,5–0,8 мм должна приводить к занижению температуры вследствие возможных неточностей установки и слишком большого для данной системы диаметра. Кроме того, в этой области происходит кипение раствора натрия в щелочи, который при расчетах считался идеальным. На больших расстояниях результаты расчета и эксперимента совпадают.

На рис. 3 нанесены кривые изменения массовых концентраций компонентов в зоне реакции. Характерной особенностью распределения концентраций является значительное массовое содержание паров щелочи (до 35%) и натрия (до 10%). Малая плотность их паров и наличие в зоне реакции до 25% массовой доли водорода приводит к тому, что объем зоны взаимодействия практически весь занят газовой фазой, а объемная концентрация конденсированных фаз незначительна (рис. 4).

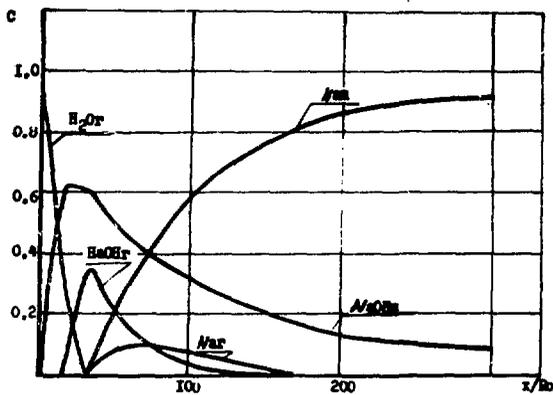


Рис. 3. Массовые концентрации реагентов в зоне взаимодействия натрия с водой

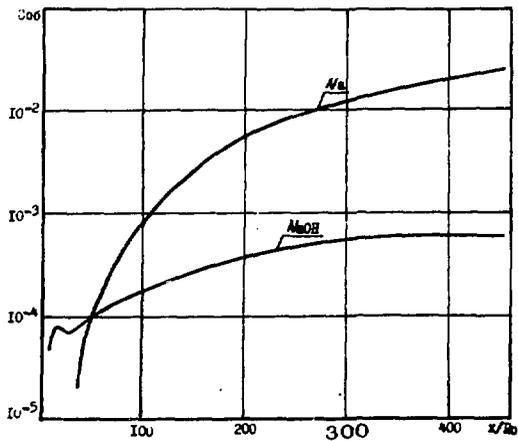


Рис. 4. Объемная концентрация конденсированных фаз.

6. РАСЧЕТ СКОРОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для определения размеров области интенсивного разрушения конструкционных материалов в зоне взаимодействия натрия с водой были проведены эксперименты по определению профиля разрушения стали IX18H9T в зоне взаимодействия натрия с водяным паром. В этих экспериментах определялся диаметр отверстия, прожигаемого в группе мишеней из стали IX18H9T, установленных вблизи места подачи пара в натрий. Расстояние между мишенями и расстояние от первой мишени до сопла составляло 5,1 мм, толщина мишеней 0,1 мм. В результате экспериментов установлено, что за 50 с при температуре натрия 500°C зона разрушения успевает распространиться на 225 радиусов отверстия, при температуре натрия 360°C длина зоны уменьшается до 170 радиусов (рис. 5).

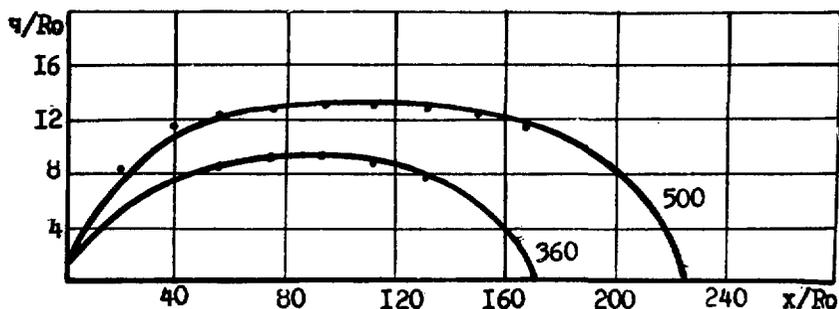


Рис. 5. Профиль разрушения стали IX18H9T:

- расчетные изотермы;
- экспериментальные данные по диаметру прожигаемого отверстия;

Сплошной линией на рис. 5 изображены расчетные изотермы 815°C для температуры натрия 500 и 360°C. Как видно на рисунке, изотермы практически совпадают с профилем разрушения. Поскольку совпадение наблюдается в широком интервале температур, нет оснований считать его случайным. Скорее всего это совпадение указывает на жесткую связь скоро-

сти разрушения с температурой. Расчетные формулы показывают, что температура и концентрация целиком определяются величиной \bar{E} , т.е. при $t = const$ все концентрации также постоянны.

Если предположить, что разрушение сталей носит в основном коррозионный характер, т.е. скорость разрушения

$$W = \kappa \prod_{i=1}^n C_i^{a_i} \exp(-E/T),$$

то линии постоянной скорости разрушения будут совпадать с изотермами.

Согласно литературным данным скорость коррозии конструкционных материалов в натрии, содержащем примеси, определяется в основном концентрацией кислорода [8].

Предположив, что в зоне взаимодействия действует тот же механизм разрушения, с учетом формулы для вычисления концентрации окиси найдем

$$W = \kappa \left[\int_0^x \frac{z}{u} dx - \int_0^{\infty} \frac{z}{u} dx \left(1 - \frac{x_*}{x} \cdot \frac{1}{1 + \frac{a^2}{4} \rho^2} \right) \right] \exp(-E/T).$$

Скорость разрушения стали IX18H9T, подсчитанная по этой формуле, показана на рис. 6. Здесь приведены экспериментальные значения скорости разрушения этой стали, полученные на статическом стенде [7]. Видно, что расчетные и экспериментальные значения температур хорошо совпадают, что говорит о правильном выборе математической модели разрушения. Если разрушение носит эрозионный характер, то должна наблюдаться некоторая корреляция между профилем разрушения, скоростью разрушения и скоростью потока, но профиль разрушения совпадает с изотермой, а сопоставление формул (6) и (7) для расчета скорости и \bar{E} показывает, что они сильно различаются. Кроме того, на кривой скорости разрушения наблюдается характерный перелом, который есть на кривой изменения температуры и отсутствует на кривой изменения скорости. Таким образом, можно, по-видимому, считать, что эрозионное разрушение не играет в зоне взаимодействия существенной роли.

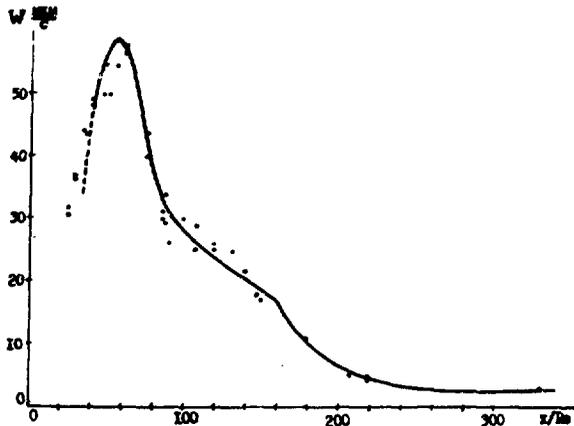


Рис. 6. Скорость разрушения стали IX18N9T:
 — — расчет; • — эксперимент

6. ВЫВОДЫ

1. Дифференциальные уравнения взаимодействия натрия с водой путем замены переменных могут быть преобразованы к уравнениям ламинарного потока не реагирующей жидкости. Расчет взаимодействия в парогенераторах различного типа сводится таким образом к решению уравнений ламинарного потока при различных граничных условиях.

2. Расчетные значения температур в зоне взаимодействия хорошо совпадают с экспериментом.

3. Скорости разрушения стали IX18N9T, вычисленные в предположении коррозионного механизма разрушения, хорошо согласуются с экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bray J.A. A review of the sodium/water experiment at Dounrey ERE. Argonne National Laboratory, Illinois, USA. November, 1968.
2. Вильямс Ф.А. Теория горения. М. "Наука", 1971, с. 486.
3. Петухов В.П., Кульпин Б.В., Мазанов А.С. Расчетное исследование полей температур и концентраций в зоне взаимодействия натрия с водой. Сборник трудов советско-американского семинара по парогенераторам быстрых реакторов. Калифорния, декабрь, 1974, с. 516.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. "Наука", 1970, с. 615.
5. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. Изд-во физико-математической литературы, М., 1960, с. 211.
6. Козлов Ф.А., Кузнецов Э.К., Сергеев Г.П. и др. Методы индикации, работа парогенераторов и второго контура при малых течах воды в натрий. Труды совещания специалистов МАГАТЭ, Мелекес, 1970.
7. Мазанов А.С., Кульпин Б.В., Петухов В.П. Исследование разрушения реагирующей струей натрий-вода различных сталей. Сборник трудов советско-американского семинара по парогенераторам быстрых реакторов. Калифорния, декабрь, 1974, с. 391.
8. Жидкие металлы. Сборник трудов под ред. Н.П.Кириллова, В.М.Субботина, П.А.Ушакова. Атомиздат, М., 1967, с.302.

Рукопись поступила в ОНТИИ 10.03.76 г.,
обработана 20.05.76 г. - окончательно
подготовлена авторами 16.08.76 г.

Редактор Породнава В.И.

Корректор Ляшюкина Л.Л.

Подписано к печати 20.09.76 г. Т-16353. Формат бумаги 60x90^I/16.

Бумага писчая № 0

I уч.-изд.л.

Тираж 170 экз.

Заказ 1512.

Цена 10 коп.

Цена 10 коп.

