

УДК 621.039.534

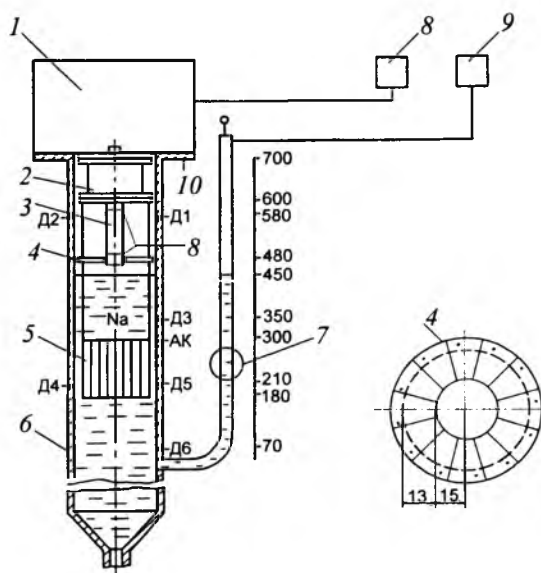
# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА МАТЕРИАЛОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ С НАТРИЕМ

Загорулько Ю.И., Жмурич В.Г., Волов А.Н., Ковалев Ю.П., Матвеев К.А.  
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

В ряду вопросов, определяющих безопасность быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, важное место принадлежит анализу сценариев тяжелых аварий с плавлением активной зоны, сопровождаемых термическим взаимодействием расплава топлива и конструкционных материалов с натрием.

Основной характеристикой термического взаимодействия в общем случае является коэффициент конверсии тепловой энергии горячей жидкости в механическую работу расширения пара холодной жидкости. Предложенные к настоящему времени фундаментальные теоретические модели — модель гомогенного зародышеобразования и детонационной волны [1, 2] — вызывают вопросы относительно их применения к системе расплав—натрий. Равным образом, несмотря на многочисленные модели фрагментации расплава [3], выбор адекватного механизма для системы расплав—натрий остается открытым. Для понимания механизмов протекания отдельных фаз термического взаимодействия необходимы исследования зависимости его энергетического эффекта от начальных условий и параметров системы. Существенной частью исследований является экспериментальная оценка кинематических характеристик перемещения взаимодействующих материалов.

Исследования проводили на установке, основными узлами которой являются камера взаимодействия (труба размером 108×8 мм из стали X18H10T, высотой 950 мм) и сопряженный с нею измерительный байпас (труба размером 32×3,5 мм), оборудованный магнитным расходомером и штырьковым уровнем (рис. 1). Имитаторы расплава материалов активной зоны (продукты горения термитных смесей  $Zr + Fe_2O_3$ ,  $MoO_3 + U$ ) создавали в термитной камере объемом 30 см<sup>3</sup>, отделяемой от камеры взаимодействия проплавляемой медной мембраной толщиной 0,5 мм. Под уровнем натрия в камере взаимодействия может размещаться затес-



Р и с. 1. Схема экспериментального участка стэнда «Плутон» для исследований термического взаимодействия расплавленного топлива с натрием: 1, 2 — форкамера и термитная камера соответственно; 3 — патрубок слива расплава термитной смеси; 4 — сборка пластинчатых элементов; 5 — затесняющая стержневая сборка; 6 — камера взаимодействия с измерительным байпасом; 7 — магнитный расходомер; 8 — проволочные датчики; 8, 9 — датчики «Сапфир-2440, -2434» соответственно; 10 — вибродатчик (акселерометр); Д1—Д6 — датчики ДПС-007

няющая стержневая сборка, содержащая 61 стержень (длина стержневого элемента 125 мм, диаметр 7 мм, материал — сталь Х18Н10Т) в гексагональной геометрии с шагом 9 мм и расстоянием в просвете между стержнями 2 мм. На выходном патрубке камеры взаимодействия располагается фильтр, содержащий цилиндрический металлокерамический элемент с размером пор 20—40 мкм (на рис. 1 не показан).

Система измерений включает датчики давления (ДСП-007, «Сапфир-2440, -2443»), вибродатчик (акселерометр), установленный на фланце камеры взаимодействия, хромель-алюмелевые термопары для измерения температуры натрия и аргона в газовых полостях экспериментального участка. Сигналы первичных датчиков через усилители КАМАК выведены на ЭВМ. Сигналы датчиков «Сапфир» и магнитного расходомера дополнительно регистрируются на самописцах КСП-4.

В патрубке слива расплава перед каждым экспериментом монтировали два проволочных датчика, изолированных от корпуса, на расстоянии 100 мм один от другого. Датчики соединялись с электрической схемой, фиксирующей последовательное прерывание токового сигнала, и служили для определения скорости расплава по времени его пролета между датчиками.

В газовой полости реакционной камеры помещали сборку из 12 калиброванных пластинчатых медных элементов толщиной 0,5 мм, консольно закрепленных по периферийной окружности, параллельно плоскости зеркала натрия на расстоянии, фиксируемом в индивидуальных экспериментах по уровню заполнения камеры взаимодействия. Измеряемые остаточные деформации изгиба и соответствующая им полная деформация пластинчатых элементов в соответствии с излагаемой методикой являются мерой воздействующей на элементы силовой нагрузки со стороны перемещаемых при термическом взаимодействии материалов (натрия, его пара, фрагментов расплава) и используются для определения кинематических характеристик этого перемещения. Калибровочные зависимости остаточной и полной деформации изгиба пластинчатых элементов от приложенной нагрузки представлены в табл. 1.

Таблица 1. Калибровочная зависимость остаточной ( $\varphi_r$ ) и полной угловой деформации изгиба ( $\varphi$ ) пластинчатых элементов от динамической нагрузки  $F(H) = A\varphi^2 + B\varphi + C$

| Интервал изменения угловой деформации, рад | Коэффициенты калибровочной зависимости |        |       |
|--------------------------------------------|----------------------------------------|--------|-------|
|                                            | $A$                                    | $B$    | $C$   |
| Остаточная деформация                      |                                        |        |       |
| 0—0,523                                    | 0                                      | 11,94  | 7,49  |
| 0,523—0,738                                | 13,5                                   | —3,36  | 11,95 |
| 0,738—0,979                                | 0                                      | 31,78  | —6,95 |
| Полная деформация                          |                                        |        |       |
| 0—0,023                                    | 0                                      | 256    | 0     |
| 0,023—0,129                                | —134,5                                 | 52,84  | 4,74  |
| 0,129—0,534                                | 0                                      | 7,53   | 7,73  |
| 0,534—0,819                                | 30,75                                  | —28,45 | 19,67 |
| 0,819—1,077                                | 0                                      | 29,17  | —6,88 |

Уравнение баланса энергии, записанное для полной угловой деформации пластинчатого элемента, имеет вид

$$\overline{M}\overline{\varphi}_i = \overline{m}_{\text{Na}}(\overline{a}_{\text{Na}} - g)\delta_i,$$

где  $\overline{M}$  — усредненный угловой момент, Дж;  $\overline{\varphi}_i$  — усредненная полная угловая деформация, рад;  $\overline{m}_{\text{Na}}$  — усредненная масса материалов, воздействующих на активную поверхность элемента, кг;  $\overline{a}_{\text{Na}}$  — усредненное ускорение материалов, м/с<sup>2</sup>;  $\delta_i$  — полное линейное перемещение крайнего основания пластинчатого элемента, соответствующее  $\overline{\varphi}_i$ , м.

Кинематические характеристики перемещаемых материалов ( $a_{\text{Na}}$ ,  $v_{\text{Na}}$  — скорость) рассчитываются на основе следующей схемы:

$$\overline{\varphi}_r \rightarrow (\overline{P}_r; \overline{P}_i) \rightarrow (\varphi_i; \delta_i) \rightarrow \overline{K}_\varphi \rightarrow \overline{P}_{i,0} \rightarrow \overline{M} \rightarrow a_{\text{Na}} \rightarrow \overline{v}_{\text{Na}},$$

где  $\overline{\varphi}_r$ ,  $\overline{\varphi}_i$  — усредненная по данным измерений остаточная и определяемая по калибровочной зависимости полная деформация изгиба, рад;  $\overline{P}_r$ ,  $\overline{P}_i$  — нагрузка на пластинчатый элемент, Н, принимаемая равной и соответствующей  $\overline{\varphi}_r$ ,  $\overline{\varphi}_i$ ;  $\overline{K}_\varphi$  — поправочный коэффициент, учитывающий изменение массы материалов и направление их силового воздействия при деформации элемента;  $\overline{v} = (2H\overline{a}_{\text{Na}})^{0,5}$  — скорость материалов на высоте  $H$ , м плоскости расположения элементов, м/с.

Поправочный коэффициент, исходя из размеров и геометрии расположения пластинчатых элементов (см. рис. 1), рассчитывается по уравнению

$$\overline{K}_\varphi = \frac{1}{\overline{\varphi}_i} \int_0^{\varphi_i} \overline{K}_\varphi d\overline{\varphi}_i = \frac{1}{\varphi} \left[ \frac{l^2}{l^2 + 2lr_0} \left( \sin \varphi_i - \frac{1}{3} \sin^3 \varphi_i \right) + \frac{2lr_0}{l^2 + 2lr_0} \left( \frac{1}{2} \varphi_i + \frac{1}{4} \sin 2\varphi_i \right) \right],$$

где  $l$ ,  $r_0$  — высота пластинчатого элемента (13 мм) и внешний диаметр патрубка слива расплава (15 мм) соответственно.

Начальная силовая нагрузка на пластинчатый элемент задается соотношением  $\overline{P}_{i,0} = \overline{P}_i / \overline{K}_\varphi$ . Кинематические характеристики перемещения натрия параллельно определяли по зависимости его расхода в измерительном байпасе от времени (на восходящем участке кривой  $G_{\text{Na}}(\tau)$ ):

$$\overline{v}_{\text{Na}} = G_{\text{Na}} / S_6; \quad \overline{a}_{\text{Na}} = \frac{d}{d\tau} (G_{\text{Na}} / S_6),$$

где  $S_6$  — поперечное сечение байпаса, м<sup>2</sup>.

При расширении системы расплав—натрий в процессе термического взаимодействия совершается механическая работа с учетом инерционных ограничений, препятствующих расширению. В условиях экспериментов доля термической энергии расплава, преобразуемая в механическую работу, затрачивается на перемещение материалов, определяемое их максимальной кинетической энергией, и неравновесное адиабатическое сжатие газа (аргона) в полостях экспериментального участка. Отсюда, принимая, что в перемещении участвует вся наличная масса натрия, коэффициент конверсии определяется выражением

$$\eta_i = \frac{0,5(m_{\text{Na}} \bar{v}_{\text{Na,max}}^2) - [1 + (S_k/S_6)] \frac{nRT_0}{\gamma - 1} [1 - (V_0/V_1)^{\gamma-1}]}{0,01 m_t Q_t},$$

где  $S_k$ ,  $S_6$  — поперечное сечение камеры взаимодействия и измерительного байпаса соответственно,  $\text{м}^2$ ;  $n$  — число молей аргона в газовой полости измерительного байпаса;  $R$  — газовая постоянная;  $T_0$ ,  $V_0$  — начальная температура и объем аргона в газовой полости измерительного байпаса соответственно;  $m_t$  — масса термитного заряда, кг;  $Q_t$  — удельная тепловая энергия термита, Дж/кг.

Объем газа, сжатого при термическом взаимодействии, определяется выражением

$$V_1 = V_0 - \int_0^{\tau} G_{\text{Na}}(\tau) d\tau,$$

экспоненциальный показатель неравновесного сжатия газа рассчитывается по экспериментальным данным

$$\gamma = \frac{\ln(P_1/P_0)}{\ln(V_0/V_1)},$$

где  $P_1$  — давление сжатого аргона;  $V_1$  — его объем.

После каждого эксперимента застывшие фрагменты расплава обрабатывали этиловым спиртом, высушивали, взвешивали и подвергали рассеву на ситах с разным размером ячеек. Просев и остатки в ситах взвешивали. Результаты анализа обрабатывали в предположении логарифмически нормального распределения с использованием зависимости [4]

$$D(\delta) = F(t) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (1)$$

где  $D$  — суммируемая доля, %;  $t = (\lg \delta - \lg \delta_{50})/\lg \delta$ ;  $\delta$ ,  $\delta_{50}$  — текущий размер фрагмента и медианное значение распределения, мм;  $\sigma$  — нормальное отклонение распределения.

Для удобства представления данные линеаризовали в виде функции

$$\lg \delta = At + B, \quad (2)$$

где  $A = \lg \sigma$ ;  $B = \lg \delta_{50}$ .

Условия проведения экспериментов представлены в табл. 2.

Скорость истечения расплава продуктов горения термитных смесей по результатам измерений составляла ~20 м/с. Работу неравновесного сжатия в газовой полости измерительного байпаса рассчитывали по уравнению

$$W = -\frac{nRT_0}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{V_0}{V_1} \right)^{\gamma-1} \right].$$

Результаты расчетов с соответствующими экспериментальными данными представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 2. Условия проведения экспериментальных исследований взаимодействия имитаторов расплава термитной смеси  $Zr + Fe_2O_3$ , эксперименты № 1, 2 и  $U + MoO_3$ , эксперименты № 3—5,  $T = 3000—3100$  К с натрием массой 3,6 кг;  $T = 823$  К в затесненном канале

| Номер эксперимента | Термитный заряд |              | Расстояние между зеркалом натрия и сборкой пластинчатых элементов, мм | Диаметр отверстия истечения расплава, мм | Условия затеснения                                                                                                                                                                                  |
|--------------------|-----------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    | масса, кг       | энергия, кДж |                                                                       |                                          |                                                                                                                                                                                                     |
| 1                  | 0,11            | 242          | 25                                                                    | 25                                       | В канал диаметром 108 мм помещена стержневая сборка (61 стержень диаметром 7 мм, высотой 125 мм в гексагональной геометрии с шагом 9 мм). Расстояние между зеркалом натрия и центром сборки ~170 мм |
| 2                  | 0,11            | 242          | 30                                                                    | 10                                       | Расстояние между зеркалом натрия и центром сборки ~145 мм                                                                                                                                           |
| 3                  | 0,108           | 194,4        | 40                                                                    | 25                                       | Свободный канал диаметром 108 мм                                                                                                                                                                    |
| 4                  | 0,112           | 201,6        | 25                                                                    | 25                                       | То же                                                                                                                                                                                               |
| 5                  | 0,112           | 201,6        | 35                                                                    | 25                                       | В канал помещена затесняющая сборка. Расстояние между зеркалом натрия и центром сборки ~160 мм                                                                                                      |

Т а б л и ц а 3. Экспериментальная и расчетная работа неравновесного сжатия аргона в газовой полости измерительного байпаса

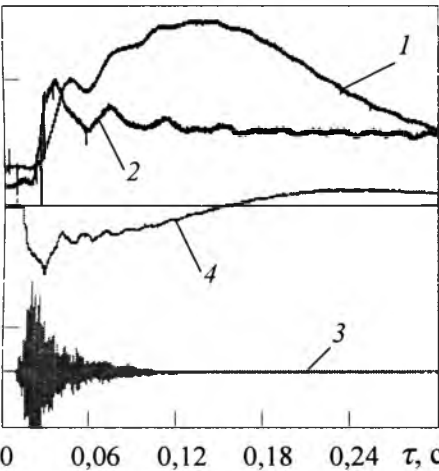
| Параметр                                                                         | Номер эксперимента |        |        |        |        |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
|                                                                                  | 1                  | 2      | 3      | 4      | 5      |
| Объем натрия, вытесненного в измерительный байпас, см <sup>3</sup>               | 160                | 120    | 82     | 66     | 85     |
| Исходный объем газовой полости измерительного байпаса, см <sup>3</sup>           | 493                | 506    | 486    | 478    | 483    |
| Объем газовой полости в конце процесса сжатия, см <sup>3</sup>                   | 333                | 386    | 404    | 412    | 398    |
| Исходное давление аргона газовой полости измерительного байпаса, МПа             | 0,1027             | 0,1027 | 0,1063 | 0,1063 | 0,1058 |
| Давление аргона в конце процесса сжатия, МПа                                     | 0,1454             | 0,1378 | 0,1198 | 0,1193 | 0,1220 |
| Расчетный экспоненциальный показатель неравновесной адиабаты                     | 1,1123             | 1,0869 | 0,7017 | 1,1372 | 0,7362 |
| Работа неравновесного сжатия аргона в газовой полости измерительного байпаса, Дж | 41,11              | 29,34  | 7,97   | 6,10   | 9,17   |

Необходимо отметить, что измеренные в экспериментах давление и объем, характеризующие предельное состояние сжатого аргона, при равновесном процессе его сжатия адиабатически не достижимы. Измерения и расчеты основных характеристик термического взаимодействия приведены в табл. 4.

Ускорение, измеренное акселерометром, характеризует перемещение стенок камеры взаимодействия, в пределах фактора 1,5—2 совпадающее с ускорением перемещения натрия. Типичное поведение сигналов основных первичных датчиков представлено на рис. 2 (эксперимент 3). Функции распределения фрагментов по размеру, полученные с использованием выражений (1), (2), приведены на рис. 3.

Т а б л и ц а 4. Измеренные и расчетные основные характеристики термического взаимодействия

| Параметр                                                      | Номер эксперимента   |                       |                      |                       |                      |
|---------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
|                                                               | 1                    | 2                     | 3                    | 4                     | 5                    |
| Остаточная деформация изгиба пластинчатых элементов, рад      | 0,855                | 0,612                 | 0,162                | 0                     | 0,165                |
| Полная деформация изгиба пластинчатых элементов, рад          | 0,939                | 0,705                 | 0,225                | ≤0,0293               | 0,230                |
| Динамическая нагрузка на пластинчатые элементы, Н             | 33,48                | 17,92                 | 9,60                 | ≤7,94                 | 9,66                 |
| Ускорение перемещения материалов, м/с <sup>2</sup> :          |                      |                       |                      |                       |                      |
| по измеренной деформации                                      | 632,1                | 321,3                 | 164,4                | 126,5                 | 165,5                |
| по кривой расхода натрия                                      | 628,9                | 340,0                 | 152,6                | 103,0                 | 159,1                |
| акселерометр (максимальное значение)                          | 378,0                | 405,7                 | 200,1                | 48,26                 | 150,3                |
| Скорость перемещения материалов, м/с:                         |                      |                       |                      |                       |                      |
| по измеренной деформации                                      | 5,62                 | 4,39                  | 3,63                 | 2,51                  | 3,41                 |
| по кривой расхода натрия                                      | 6,12                 | 4,59                  | 2,89                 | 2,07                  | 2,96                 |
| Общая работа неравновесного адиабатического сжатия газа, Дж   | 556,6                | 397,2                 | 107,9                | 82,6                  | 124,1                |
| Максимальная кинетическая энергия перемещаемых материалов, Дж | 67,4                 | 34,7                  | 15                   | 7,7                   | 15,7                 |
| Коэффициент конверсии, %                                      | 3,2·10 <sup>-1</sup> | 1,78·10 <sup>-1</sup> | 6,3·10 <sup>-2</sup> | 4,47·10 <sup>-2</sup> | 6,9·10 <sup>-2</sup> |



Р и с. 2. Показания датчиков в эксперименте 3: 1, 2 — «Сапфир-2444 (P2), -2443 (P3)» соответственно; 3 — вибродатчик; 4 — расходомер

которым экспоненциальным убыванием амплитудных характеристик. Ступенчатый характер протекания термического взаимодействия подтверждается анализом поведения кривых расхода натрия в измерительном байпасе, где наблюдаются заметные флуктуации кинематических характеристик перемещения натрия, по времени совпадающие с изменениями сигнала акселерометра.

Анализ результатов позволяет сформулировать модель термического взаимодействия в системе расплав—натрий:

Анализ показал, что основная часть фрагментов во всех экспериментах (за исключением сфероидных частиц размером <150—200 мкм) имеет неправильную форму, свидетельствующую о разрушении частично отвердевших более крупных фрагментов расплава. Детальное исследование в увеличенном временном масштабе сигналов вибродатчика (акселерометра) обнаруживает сложный многоступенчатый характер термического взаимодействия. Первая фаза длительностью 0,05—0,1 с, как показывает частотно-амплитудный анализ, соответствует кипению натрия в переходном режиме на первичных фрагментах расплава. Последующая стадия термического взаимодействия характеризуется последовательностью групп волн с некоторым

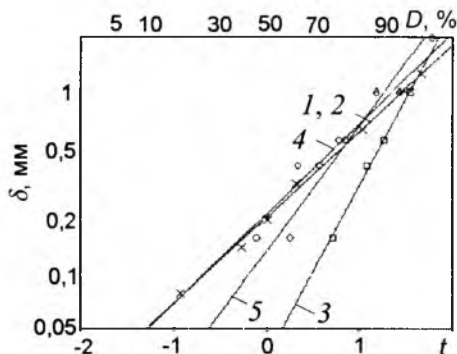
при высокой скорости истечения (при числе Вебера, превышающем критическое) за счет ударной фрагментации образуются фрагменты расплава диоксида урана, распределение которых по размеру подчиняется логарифмически нормальному закону. Мгновенная температура поверхности фрагментов при их контакте с натрием существенно ниже температуры отвердевания диоксида урана (при температуре натрия 823 К она составляет ~1473 К);

перемешивание первоначальных фрагментов расплава с натрием происходит в условиях переходного режима его кипения на поверхности затвердевающих фрагментов. Степень когерентности первоначального контакта и условия затеснения объема натрия существенно влияют на перемешивание и в конечном итоге на энергетический потенциал термического взаимодействия;

термические напряжения, возникающие при отвердевании фрагментов диоксида урана, являются основным механизмом, определяющим процесс тонкой фрагментации в системе натрий—диоксид урана. Первичные фрагменты достигают состояния готовности к дальнейшему разрушению при их поверхностном отвердевании на глубину, превышающую 75 мкм. Время, необходимое для отвердевания фрагментов диаметром 0,5—1 мм на эту глубину, как следует из экспериментальных данных, соответствует длительности фазы грубого перемешивания фрагментов расплава с натрием. Фрагменты размером <100—200 мкм могут отвердевать полностью, не подвергаясь дальнейшему разрушению;

фрагментация частиц расплава с данным характерным размером реализуется в виде ступенчатого процесса. Наложение процессов фрагментации индивидуальных частиц с близкими размерами приводит к экспериментально наблюдаемой картине (характерному среднему времени, разделяющему отдельные группы волн, и убывающим амплитудным характеристикам вследствие снижения числа частиц, способных к фрагментации);

эволюция паровой фазы, образующейся при термическом взаимодействии диоксида урана с натрием, определяется кинетикой процесса ее конденсации при контакте с натрием. Снижение недогрева натрия приводит к возрастанию коэффициента конверсии термического взаимодействия.



Р и с. 3. Логарифмически нормальные функции распределения фрагментов в опытах по взаимодействию расплавов термитов  $Zr + Fe_2O_3$  (1) и  $U + MoO_3$  (2—4) с натрием:  $D$  — массовая доля фрагментов размером меньше  $\delta$ ; 1—5 — номер группы точек и аппроксимирующих их прямых, соответствующий номеру опыта

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fauske H. On the mechanism of uranium dioxide-sodium explosive interactions. — Nucl. Sci. Engng, 1973, v. 51, p. 95—101.
2. Board S., Hall R.W., Hall R.S. Detonation of fuel-coolant explosions. — Nature, 1975, № 254, p. 319—321.
3. Cronenberg A., Grolmes M. Fragmentation modeling relative to the breakup of molten  $UO_2$  in sodium. — Nucl. Safety, 1976, v. 16, № 6, p. 683—704.
4. Коузов П.А. Основы анализа дисперсионного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1987.