

Расчет производительности и оптимизация параметров хемоядерных установок

Б. Г. ДЗАНТИЕВ, А. К. КРАСИН, Г. В. НИЧИПОР, В. Т. КАЗАЗЯН, И. А. САВУШКИН УДК 541.15+621.039.05

Производительность радиационнохимической установки является важнейшей характеристикой, во многом определяющей эффективность установки. Она непосредственно связана с энергией, поглощаемой химическим реагентом. В общем случае производительность Π любого радиационнохимического аппарата определяется уравнением [1]

$$\Pi = kM \int_{V_{p.o}} G(I, t, \tau, p) I(\kappa_i, \omega_i) dV, \quad (1)$$

где M — молекулярный вес облучаемой среды; I — мощность поглощенной дозы, $\text{эв/см}^3 \cdot \text{сек}$; κ_i — пространственные координаты; ω_i — обобщенное обозначение свойств среды и характера спектра излучения; k — постоянная размерности; $V_{p.o}$ — реакционный объем аппарата; G — радиационнохимический выход, $\text{мол}/100 \text{эв}$; t , τ , p — температура, время контакта и давление реагента.

Вычисление интеграла в уравнении (1), как правило, представляет значительные трудности. В большинстве случаев нельзя получить точно-го аналитического определения интеграла из-за сложного характера зависимости $G(I, t, \tau, p)$ и $I(\kappa_i, \omega_i)$ от многочисленных факторов. Поэтому используются различные пути приближенного решения.

Производительность хемоядерных установок целесообразно определять по кинетической энергии осколков деления, которая составляет ~84% энергии деления. В этом случае эффективным путем приближенного решения уравнения (1) является сведение его к численному суммированию производительностей отдельных хемоядерных каналов. Производительность различных вариантов хемоядерного канала может быть определена более точно с учетом многих факторов, если известен механизм образования целевого продукта. При этом решение системы кинетических уравнений, описывающих эле-

ментарные реакции, позволяет определять распределение концентраций конечных продуктов в любой момент времени по длине канала.

Рассмотрим такой подход к расчету производительности экспериментальных и промышленных хемоядерных установок на примере синтеза гидразина.

В работе [2] на основе уравнений химической кинетики исследовалось влияние температурных режимов канала хемоядерного реактора на конечные концентрации продуктов радиолитиза аммиака в условиях неизотермического течения газа и переменной мощности дозы. Однако полученные результаты еще не могут быть непосредственно приложены к конкретной конструкции канала, поскольку для упрощения расчетов не учитывались изменения эффективности использования энергии осколков и скорости течения реагента в результате возрастания температуры по длине канала, а также другие эффекты.

В настоящей работе предлагается более общая модель расчета производительности хемоядерного канала. На основе предложенной модели проводится расчет производительности и оптимизация параметров канала на хемоядерной петлевой установке. Рассматривается возможность осуществления синтеза гидразина на базе хемоядерного реактора в промышленном масштабе.

Метод расчета

На основании результатов кинетического анализа, проведенного в работах [3, 4], с учетом уравнения массопереноса распределение концентраций компонент радиолитизуемой газовой смеси по длине канала z для процесса образования гидразина из газообразного аммиака в предположении, что диффузионным переносом вещества в направлении движения потока можно пренебречь, запишем в виде следующей

стационарной системы уравнений [5]:

$$\frac{d[(H)/\gamma(z)]}{dz} = [W - 2k_3M(H)^2 - k_2M(H)(R) - k_4(H)(\Gamma) - k_6(H)(A)] \frac{S}{g}; \quad (2)$$

$$\frac{d[(R)/\gamma(z)]}{dz} = [W - 2k_1M(R)^2 - k_2M(H)(R) - k_5(R)(\Gamma) + k_6(H)(A)] \frac{S}{g}; \quad (3)$$

$$\frac{d[(\Gamma)/\gamma(z)]}{dz} = [k_1M(R)^2 - k_4(H)(\Gamma) - k_5(R)(\Gamma)] \frac{S}{g}; \quad (4)$$

$$\frac{d[(H_2)/\gamma(z)]}{dz} \approx [k_6(H)(A) + k_3M(H)^2 + k_4(H)(\Gamma)] \frac{S}{g}. \quad (5)$$

Здесь (H) , $(R) = (NH_2)$, $(\Gamma) = (N_2H_4)$, $(A) = (NH_3)$, (H_2) — текущие концентрации радикальных и молекулярных компонент; $M = (A) + (H_2) + (\Gamma) + (R) + (H) \approx (A)$; $k_1, k_2, k_3, \dots, k_i$ — константы скоростей соответствующих элементарных реакций, входящих в систему уравнений (2) — (5); g — весовой расход реагента, кг/сек; S — проходное сечение по реагенту в канале, м²; $\gamma(z)$ — текущая плотность реагента по высоте канала, кг/м³.

Учитывая, что общее давление смеси является суммой парциальных давлений всех компонент, изменение концентрации аммиака по высоте канала зададим алгебраическим уравнением вида

$$(A) = \frac{p}{RT(z)} - [(H) + (R) + (\Gamma) + (H_2)]. \quad (6)$$

Тогда для производительности по конечному продукту можно записать следующее уравнение:

$$\Pi_i = M_i g_i \sum_{n=1}^n \frac{\Delta C_{in}}{\gamma_{in}}, \quad (7)$$

где ΔC_{in} — изменение текущей концентрации i -го продукта на n -м участке по высоте канала; M_i — молекулярный вес i -го продукта.

Для определения скорости первичного разложения аммиака W можно использовать формулу

$$W = G_{(-NH_3)} \cdot 10^{-2} I(z), \quad (8)$$

где $G_{(-NH_3)}$ — величина первичного радиационного выхода разложения аммиака; $I(z)$ — зна-

чение мощности поглощенной дозы по высоте канала, эв/см³·сек.

Для того чтобы замкнуть систему уравнений (2) — (6) необходимо задать закон изменения температуры $T(z)$, мощности дозы $I(z)$ и плотности реагента $\gamma(z)$ от координаты z .

Приняв, что изменение мощности дозы по высоте канала следует произведению синусоидального изменения потока нейтронов по высоте канала и эффективности использования энергии осколков деления, запишем

$$I(z) = I_{\text{макс}} \sin \frac{\pi(z + 2\delta)}{H_{\text{эфф}}} \varepsilon(z), \quad (9)$$

где δ — эффективная добавка. В случае хемоядерного топлива в виде пакета параллельных пластин для вычисления $\varepsilon(z)$ можно использовать формулы из работ [1, 6].

Для хемоядерного топлива с цилиндрическими каналами значение эффективности в элементарных функциях не выражается. В этом случае расчеты эффективности могут быть выполнены методом Монте-Карло [7], результаты вычислений с хорошей точностью (не хуже $\pm 6\%$) можно аппроксимировать линейным законом:

$$\varepsilon\left(\frac{z}{H_K}\right) = n \frac{z}{H_K} + m.$$

Значения коэффициентов n и m , например, для случая тонких слоев (1—5 мк) из UO₂, нанесенных на внутреннюю поверхность цилиндра диаметром $b = 2$ мм, и газофазного аммиака в качестве реагента при давлении $p = 10$ ата приведены в табл. 1.

Для учета зависимости пробега осколков деления от плотности реагента по высоте канала $R_B(z)$ использовалось соотношение

$$R_B(z) = R_{0.в} \frac{\gamma_0}{\gamma(z)}.$$

Для зависимости $T(z)$ в случае синусоидального закона распределения тепловыделения по

Значение коэффициентов m и n для канала диаметром $b = 0,2$ см Таблица 1

Толщина топлива, мк	$\frac{z}{H_K} \leq 0,5$		$\frac{z}{H_K} > 0,5$	
	m	n	m	n
1	0,272	-0,0447	0,237	-0,029
3	0,174	-0,0227	0,1607	-0,0187
5	0,116	-0,0113	0,112	-0,0133

высоте канала можно использовать выражение

$$T(z) = T_0 + \frac{\Delta T}{2} \left[1 - \cos \frac{\pi z}{H_{эфф}} \right].$$

Здесь T_0 , γ_0 , $R_{0,в}$ — температура, плотность реагента и пробег осколков на входе в канал; ΔT — подогрев реагента по высоте канала.

Изменение плотности $\gamma(z)$ находилось из уравнения идеального газа и учитывалось при расчете эффективности и времени пребывания реагента в зоне облучения с данной мощностью дозы $I(z)$.

Решая систему уравнений (2) — (7) при начальных условиях:

$$\begin{aligned} (NH_3) \Big|_{z=0} &= \frac{P}{RT_0}; \quad (R) = (H) = (I) = \\ &= (H_2) \Big|_{z=0} = 0, \end{aligned}$$

находим распределение концентрации продуктов и величину производительности по длине канала при выбранных значениях скоростей реакции и заданных законах изменения параметров. Необходимые при расчете значения констант k_i приведены в работах [3, 4].

Данный алгоритм был запрограммирован на ЭВМ «Минск-22». Для решения системы нелинейных кинетических уравнений использовался метод Рунге — Кутты четвертого порядка.

Таким образом, рассмотренный метод в сочетании с нейтроннофизическими расчетами позволяет определять производительность хемоядерных установок различного типа и назначения с учетом изменения таких факторов, как мощность дозы, температура, плотность реагента и т. д., что является значительным приближением к реальным условиям, имеющим место в экспериментальных и промышленных хемоядерных установках.

Расчет производительности и оптимизация параметров канала хемоядерной петлевой установки

Рассмотренный метод был использован для расчета производительности и оптимизации параметров канала хемоядерной петлевой установки (ХЯУ-5). Принципиальная конструкция и основные технические характеристики канала ХЯУ-5 приведены в работах [8, 9]. В качестве основного критерия, определяющего оптимальность конструкции канала, целесообразно выбрать зависимость производительности от тепловой мощности канала. Такой выбор определяется тем, что, во-первых, полная тепловая мощ-

ность канала, как правило, ограничена возможностями экспериментального оборудования и условиями радиационной безопасности в месте монтирования петлевой установки (для ХЯУ-5 максимальная тепловая мощность составляет ~ 10 кВт) [8, 9]; во-вторых, тепловая мощность непосредственно связана с теплофизическими, гидравлическими и радиационными условиями проведения процесса. Причем, если выразить изменение тепловой мощности через изменение таких параметров, как толщина топлива и расстояние между топливными пластинами, можно провести полную оптимизацию конструкции канала.

Расчет проводился для двух давлений газообразного аммиака 5 и 10 атм с температурой на входе в канал $T_0 = 323^\circ \text{K}$ и на выходе $T_{\text{вых}} = 473^\circ \text{K}$. Таким образом, подогрев по высоте канала был постоянным и составлял 150°C . Исходные данные для расчета (мощность дозы, расход и пр.) и значения тепловой мощности в зависимости от расстояния между топливными пластинами и толщины слоев топлива взяты из работы [9].

На рис. 1 показана зависимость производительности от тепловой мощности установки,

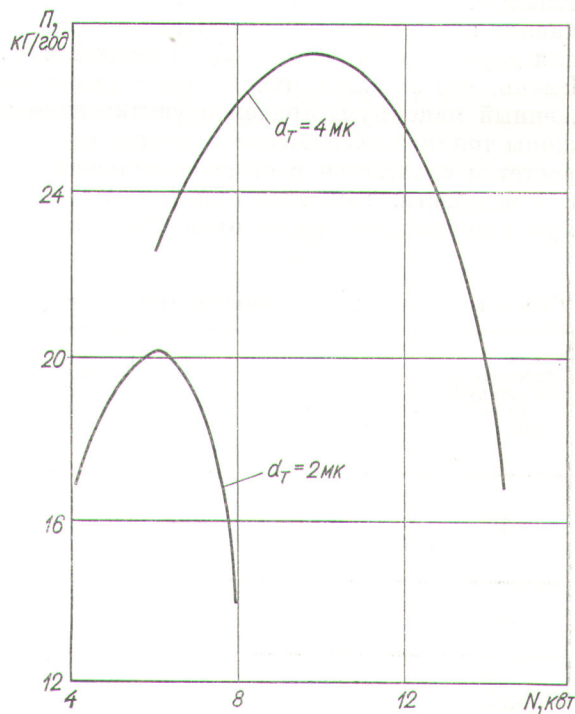


Рис. 1. Зависимость производительности канала ХЯУ-5 от тепловой мощности установки при изменении последней за счет расстояния между топливными пластинами.

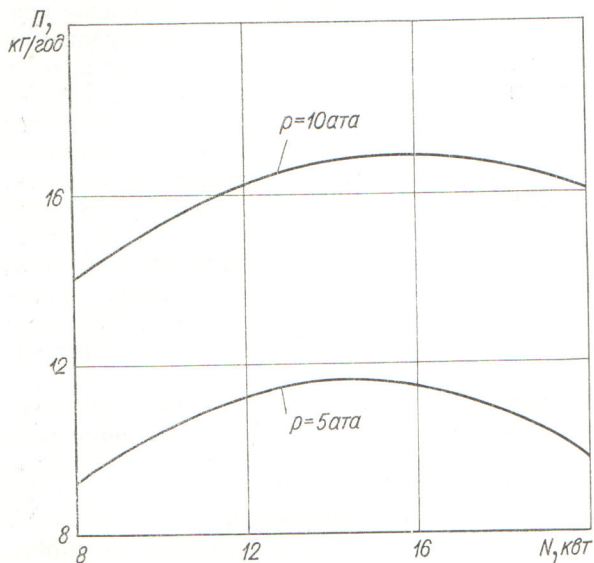


Рис. 2. Зависимость производительности канала ХЯУ-5 от тепловой мощности установки при изменении последней за счет изменения толщины топлива.

при изменении последней за счет изменения расстояния между плоскими топливными пластинами, размещенными перпендикулярно к оси канала заданной высоты H . Кривые приведены для двух толщин топлива d_T , равных 2 и 4 мм. Видно, что эта зависимость имеет резко выраженный максимум, причем с увеличением толщины топлива абсолютное значение максимума растет и сдвигается в сторону большей тепловой мощности. Так, если при $d_T = 2$ мм максимум производительности приходится на тепло-

вую мощность $N = 6$ кВт и составляет 20,2 кг/год гидразина, то при $d_T = 4$ мм максимуму соответствует мощность $N = 10$ кВт и его величина равна 27 кг/год.

На рис. 2 приведена аналогичная зависимость производительности от толщины топлива для фиксированного расстояния между пластинами $b = 0,1$ см и двух значений давления 5 и 10 ата. Эта зависимость имеет более плавный характер, и можно считать, что максимум реализуется в диапазоне тепловых мощностей 14–15 кВт, т. е. при толщинах топливного слоя 4–5 мм.

Как видно из табл. 2, увеличение тепловой мощности канала за счет повышения плотности загрузки топливных пластин приводит, как и следовало ожидать, к возрастанию максимального значения мощности дозы и, что на первый взгляд странно, к уменьшению концентрации гидразина на выходе из канала. Этот эффект связан с уменьшением плотности и увеличением скорости течения радиолизируемого газа, т. е. с уменьшением среднего времени контакта.

Из табл. 2 видно, что время контакта изменяется быстрее, чем возрастает мощность дозы. Так, для случая $p = 10$ ата и $d_T = 2$ мм среднее время контакта уменьшается от $\tau = 0,98$ сек при $b = 0,35$ см до $\tau = 0,312$ сек при $b = 0,1$ см, т. е. в 3,1 раза, в то время как мощность дозы соответственно увеличивается с $0,52 \cdot 10^{19}$ до $1,2 \cdot 10^{19}$ эв/см³·сек, т. е. только в 2,3 раза. Согласно работам [3, 4], для рассматриваемых условий можно предположить, что в среднем по высоте канала изменение концентрации гидразина определяется мощ-

Основные расчетные радиационнохимические характеристики ХЯУ-5 при $p = 10$ ата

Таблица 2

Расстояние между пластинами, см	$\frac{d_T}{R}$	Полная тепловая мощность канала, кВт	Среднее время контакта, сек	Величина эффективности *, ϵ_1/ϵ_2	Производительность по N_2H_4 , кг/год	Удельная производительность по N_2H_4 , $\frac{кг}{см^3 \cdot год}$	Реализуемое среднее значение G , мол/100 эв	Концентрация N_2H_4 на выходе из канала $\times 10^{-5}$, моль/л	Максимальная мощность дозы в реактенте $\times 10^{19}$, $\frac{эв}{см^3 \cdot сек}$
0,1	0,25	8,0	0,312	0,206/0,161	14,0	0,0140	0,107	0,43	1,2
	0,50	14,4	0,177	0,132/0,107	16,8	0,0168	0,112	0,29	1,38
	0,75	19,8	0,126	0,092/0,073	16,2	0,0162	0,104	0,20	1,34
0,2	0,25	6,0	0,58	0,250/0,220	20,0	0,0146	0,165	0,84	0,84
	0,50	12,0	0,29	0,158/0,143	25,6	0,0157	0,165	0,61	1,04
0,35	0,25	4,0	0,98	0,254/0,251	16,4	0,0087	0,190	1,01	0,52
	0,50	6,0	0,66	0,160/0,159	22,4	0,0118	0,270	0,93	0,50

* ϵ_1 и ϵ_2 — соответственно значения эффективности на входе и выходе из канала при $R = 8$ мм.

ностью дозы в степени 0,5 и временем контакта τ . Одновременное действие этих факторов приводит к тому, что, несмотря на увеличение мощности дозы, концентрация гидразина на выходе из канала падает. Поскольку производительность установки пропорциональна произведению конечной концентрации на весовой расход реагента, то это приводит к оптимуму.

Более резкий характер экстремальной зависимости производительности от тепловой мощности при изменении последней за счет плотности загрузки пластин топлива, чем от толщины топлива, связан с дополнительным возрастанием скорости реагента в результате уменьшения свободного объема канала.

На основании выполненной оптимизации параметров ХЯУ-5 можно рекомендовать: при мощности до 10 *квт* использовать толщину топливного слоя не более 4 *мк*. При этом для любой толщины в диапазоне 1—4 *мк* для получения максимума производительности необходимо, чтобы расстояние между пластинами составляло 0,2 *см*. Результаты расчетов указывают на возможность использования исследовательского реактора для проведения хемоядерных экспериментов в пилотном масштабе.

Возможность организации промышленного синтеза гидразина на базе хемоядерного реактора

Рассмотрение проводилось на примере реактора, использующего хемоядерное топливо в виде слоя UO_2 (90%-ного обогащения) толщиной 4 *мк*, нанесенного на алюминиевую подложку. Конструкция хемоядерного элемента (ХЭЛ) представляет собой многозаходную гофрированную спираль с высотой гофра 2 *мм*, упакованную в цилиндрический канал из нержавеющей стали диаметром 5 *см* [10]. В качестве материала замедлителя использовалась вода. Размеры реактора $H \times D = 3 \times 3$ *м*, тепловая мощность $N = 500$ *Мвт*, загрузка по U^{235} приблизительно 700 *кг*. Для расчета нейтронно-физических характеристик реактора использовался 10-групповой диффузионный метод [11].

Необходимые изменения, учитывающие специфику расчета кампания хемоядерного реактора, вводились на основании результатов, изложенных в работе [12]. Производительность реактора определялась методом суммирования производительностей отдельных зон реактора. Производительность каждой зоны находилась суммированием производительностей отдельных хемоядерных каналов Π_k (внутри каждого ка-

нала мощность поглощенной дозы может рассматриваться постоянной по радиусу и переменной по высоте).

Согласно этому для производительности хемоядерного реактора можно записать

$$\Pi_p = \sum_{m=1}^7 n_m \Pi_{k,m},$$

где n_m — число каналов в зоне m ; $\Pi_{k,m}$ — производительность канала в зоне m ; m — число зон реактора. Производительности отдельного канала в зоне рассчитывались по его средней тепловой мощности.

Средняя тепловая мощность канала в зоне находилась из соотношения

$$N_{k,m} = \frac{N_0 q_m}{n_m},$$

где N_0 — тепловая мощность реактора; q_m — доля общего энерговыделения в реакторе в m -й зоне.

Для определения q_m в многогрупповом диффузионном приближении в предположении, что пространственное распределение энерговыделения по активной зоне не меняется за интервал времени Δt_k , можно записать

$$q_m = \frac{\int_{V_m} dV \sum_{j=1}^{10} \Sigma_{fj} \Phi_{j,k-1}(r)}{\int_{V_{a.3}} dV \sum_{j=1}^{10} \Sigma_{fj} \Phi_{j,k-1}(r)},$$

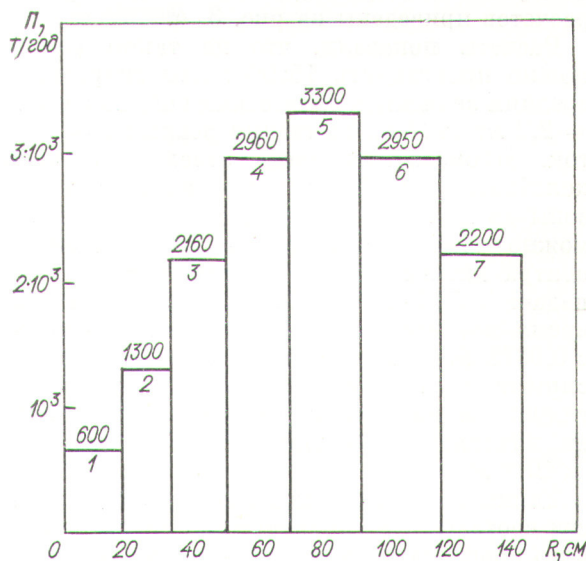


Рис. 3. Диаграмма производительности активной зоны промышленного хемоядерного реактора ($N = 500$ *Мвт*, $d_r = 4$ *мк*).

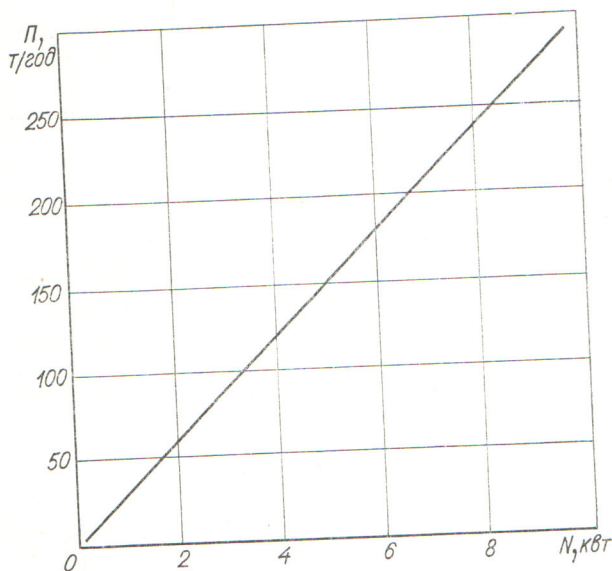


Рис. 4. Производительность канала промышленного реактора в зависимости от его тепловой мощности ($d_T = 4$ мм).

где $V_m, V_{a.z}$ — объем m -й зоны и полный объем активной зоны; Σ_{jj} — макроскопическое сечение деления; $\Phi_{j,k}$ — интегральный поток нейтронов j -й группы в k -й момент времени. Производительность рассчитывалась при давлении реагента $p = 10$ ата в диапазоне температур от $T_0 = 323^\circ \text{K}$ до $T_{a.z} = 523^\circ \text{K}$. Результаты расчетов приведены на рис. 3, 4.

Расчеты показали, что на таком реакторе можно производить 15500 т/год гидразина со средним значением энергетического выхода $G = 2,3$ мол./100 эв, кампания реактора ~ 500 суток. Производительность отдельного канала колеблется от 120 т/год в центре активной зоны до 20 т/год на краю активной зоны. Это можно объяснить тем, что при движении от центра активной зоны к краю мощность дозы падает с $5,85 \cdot 10^{20}$ до $0,85 \cdot 10^{20}$ эв/см³·сек, в то время как среднее время контакта возрастает с 0,0375 до 0,26 сек. Эти два параметра компенсируют друг друга, поэтому концентрация гидразина на выходе из канала практически не изменяется и составляет $(0,700 \div 0,763) \times 10^{-4}$ мол./л.

Таким образом, изменение производительности соответствует практически изменению весового расхода реагента, который составляет 8,0 кг/сек в центре активной зоны и 1,36 кг/сек на краю активной зоны. Построенная зависимость производительности канала от его тепло-

вой мощности показывает, что эта зависимость носит линейный характер (см. рис. 4). Это связано с тем, что в условиях промышленного реактора мы имеем линейное накопление концентрации конечного продукта по длине канала. Полученная зависимость позволяет проводить расчет производительности других активных зон хемоядерных реакторов.

Из диаграммы, представленной на рис. 3, видно, что максимальное значение производительности приходится на пятую зону, расположенную на радиусе 70—90 см. Это обусловлено тем, что при переходе от первой зоны к седьмой, несмотря на то что производительность отдельного канала падает, число каналов в зонах растет. Из диаграммы также следует, что имеются широкие возможности по оптимизации активной зоны хемоядерного реактора с целью повышения его производительности. Таким образом, полученные результаты показывают возможность организации синтеза гидразина на базе хемоядерного реактора в промышленных масштабах и позволяют проводить анализ экономической перспективности этого процесса.

Поступила в Редакцию 4/V 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Х. Брегер и др. Основы радиационно-химического аппаратостроения. М., Атомиздат, 1967.
2. Б. Г. Дзантиев и др. «Атомная энергия», 29, 71 (1970).
3. Б. Г. Дзантиев, Г. В. Ничипор. «Изв. АН БССР. Серия физ.-энерг. наук», № 1, 48 (1969).
4. Б. Г. Дзантиев, А. К. Красин, Г. В. Ничипор. «Изв. АН БССР. Серия физ.-энерг. наук», № 1, 53 (1970).
5. В. Б. Нестеренко, Б. Е. Тверковкин. «Изв. АН БССР. Серия физ.-техн. наук», № 2, 20 (1968).
6. Б. А. Литвиненко. «Изв. АН БССР. Серия физ.-техн. наук», № 3, 16 (1966).
7. Л. П. Рогинец, С. Г. Розин. «Изв. АН БССР. Серия физ.-энерг. наук», № 1, 50 (1968).
8. А. К. Красин, Е. П. Петряев, Г. И. Стрелков. «Изв. АН БССР. Серия физ.-энерг. наук», № 1, 29 (1968).
9. А. К. Красин, Б. А. Литвиненко, И. А. Савушкин. «Изв. АН БССР. Серия физ.-энерг. наук», № 3, 5 (1968).
10. M. Steinberg, J. Farber. BNL-827 (T-322), 1963.
11. В. А. Наумов. «Изв. АН БССР. Серия физ.-техн. наук», № 1, 26 (1965).
12. И. А. Савушкин. «Изв. АН БССР. Серия физ.-энерг. наук», № 2, 5 (1970).