

УДК 621.039.531/534

В.М. Мордвинцев, Н.Г. Кодочигов, Ю.П. Сухарев

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВВОДА
В ШАРОВУЮ ЗАСЫПКУ ВТГР СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОСТИ**

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

Целью проведенных исследований являлась отработка методологии оценки усилий внедрения погружных стержней системы компенсации реактивности насыпной активной зоны и прогнозирование усилий внедрения в существующих проектах газоохлаждаемых реакторов, определения эффектов сопутствующих внедрению стержней, а также оценка возможности использования, в качестве резервной, шариковой системы компенсации реактивности. Применялся экспериментально-расчетный подход к определению усилий внедрения погружных стержней, основанный на физическом моделировании процесса внедрения стержней с использованием принципов теории подобия, теории планирования экспериментов с дисперсионным и регрессионным анализом результатов. Разработана степенная зависимость для пересчета результатов модельных испытаний на натурные объекты; получены оценки усилий внедрения стержней в шаровые засыпки активных зон известных проектов ВТГР. Проведено сравнение полученных результатов с данными зарубежных исследований. Установлены особенности и эффекты при заполнении засыпок шаровых твэлов мелкими шариками – поглощающими элементами (пэлами).

Разработанная методология прогнозирования усилий внедрения стержней в шаровые засыпки дает возможность проводить на стадии проектирования реакторов оценку работоспособности погружных стержней и механизмов СУЗ, оптимизировать их конструкцию.

Ключевые слова: система компенсации реактивности, шаровые твэлы, усилие внедрения стержня, дисперсионный и регрессионный анализы, резервная система компенсации реактивности, мелкие поглощающие шары (пэлы).

Введение

При проектировании высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) большой мощности типа проектов ТНТР-300 и ВГ-400 с объемом активной зоны в 700-800 тыс. шаровых твэлов актуален вопрос изучения процесса внедрения в засыпку твэлов погружных стержней компенсации реактивности. В реальных условиях работы установки, а также при полномасштабном моделировании шаровой засыпки это является трудновыполнимой задачей. В связи с этим процессы внедрения изучались путем физического моделирования на разномасштабных моделях активной зоны (а.з.) [1, 2] с последующей оценкой натуральных параметров на полномасштабных фрагментах. Одной из проблем проектирования ВТГР большой единичной мощности с шаровыми твэлами является разработка резервной системы компенсации реактивности. В аварийных ситуациях с разгерметизацией первого контура одним из способов компенсации может быть ввод в активную зону мелких поглощающих шариков (пэлов) [3].

Решению этих проблем посвящена данная работа. Несмотря на то, что приведенные данные по экспериментальным исследованиям получены в период работ по проектированию реактора ВГ-400, в настоящей статье они дополнены новой информацией и переосмыслены, представляя определенную ценность в связи с разработкой и строительством ВТГР с насыпной активной зоной за рубежом, а также возможным продолжением разработки таких реакторов в России.

Постановка задачи исследований

Разработка методологии получения на стадии проектирования реакторов оценок величины усилий внедрения в засыпку шаровых твэлов погружных стержней компенсации реактивности предполагает решение следующих задач:

- получение экспериментальных данных о нагрузках на стержни на моделях активной зоны;
- анализ факторов определяющих на величину нагрузок на стержни;
- разработка зависимостей пересчета полученных данных на натурные условия различных проектов ВТГР.

Экспериментальные исследования внедрения погружных стержней

Целесообразность физического моделирования ввода погружных стержней на полномасштабных фрагментах шаровой засыпки обусловлена возможностью получения необходимой информации при использовании (наличии) минимального количества полномасштабных графитовых макетов шаровых твэлов (диаметром 0,06 м).

Этапы моделирования состоят в следующем [3].

1. На первом этапе на уменьшенных моделях бункера проводятся эксперименты с внедрением группы стержней, в количестве предусмотренным проектом, и определяются усилия внедрения, приходящиеся на единичные стержни, а также в целом на всю группу. Определяется также степень влияния различных факторов на процесс внедрения.
2. На втором этапе на уменьшенных моделях проводятся эксперименты с внедрением одного стержня во фрагменты шаровой засыпки различного объема и определяется фрагмент с диаметром ограничивающей обечайки, обеспечивающий значения по усилиям внедрения аналогичные полученным на первом этапе.
3. На третьем этапе на полномасштабном фрагменте с размерами, определенными на втором этапе, проводятся эксперименты с внедрением единичного стержня в засыпку графитовых макетов шаровых твэлов и определяются (оцениваются) усилия внедрения, миграция шаров и наличие возможных повреждений шаровых элементов для натуральных условий.

В итоге разрабатывается эмпирическая зависимость для пересчета усилий внедрения, получаемых при модельных испытаниях на натурный объект.

Одной из проблем проектирования ВТГР большой единичной мощности с шаровыми твэлами является разработка резервной системы компенсации реактивности. В аварийных ситуациях с разгерметизацией первого контура одним из способов компенсации может быть ввод в активную зону мелких поглощающих шариков (пэлов) [3].

Указанный выше алгоритм проведения исследований по определению усилий при погружении стержней был реализован на моделях активной зоны проекта ВГ-400 с масштабами М1:46; 1:10, 1:3, предусматривающий внедрение в засыпку группы из 55 стержней с диаметром стержня $d_{ст}=2d_{ш}$ на глубину до $80d_{ш}$, а также на фрагменте с графитовыми шарами М1:1. На рис. 1 представлена схема исследования процессов внедрения погружных стержней.

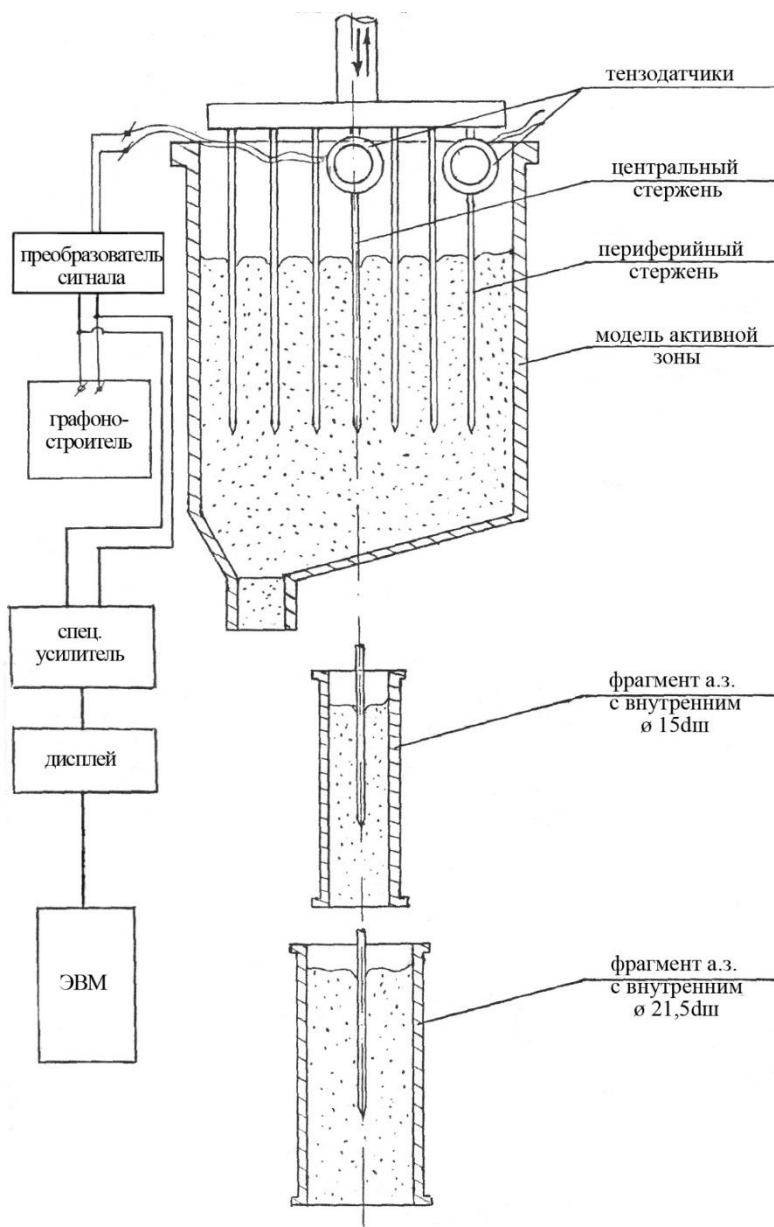


Рис. 1. Схема исследования процессов внедрения погружных стержней

Результаты исследований

На рис. 2 представлены типовые графики распределения усилий внедрения стержней по глубине внедрения (до глубины внедрения 35 диаметров шаров).

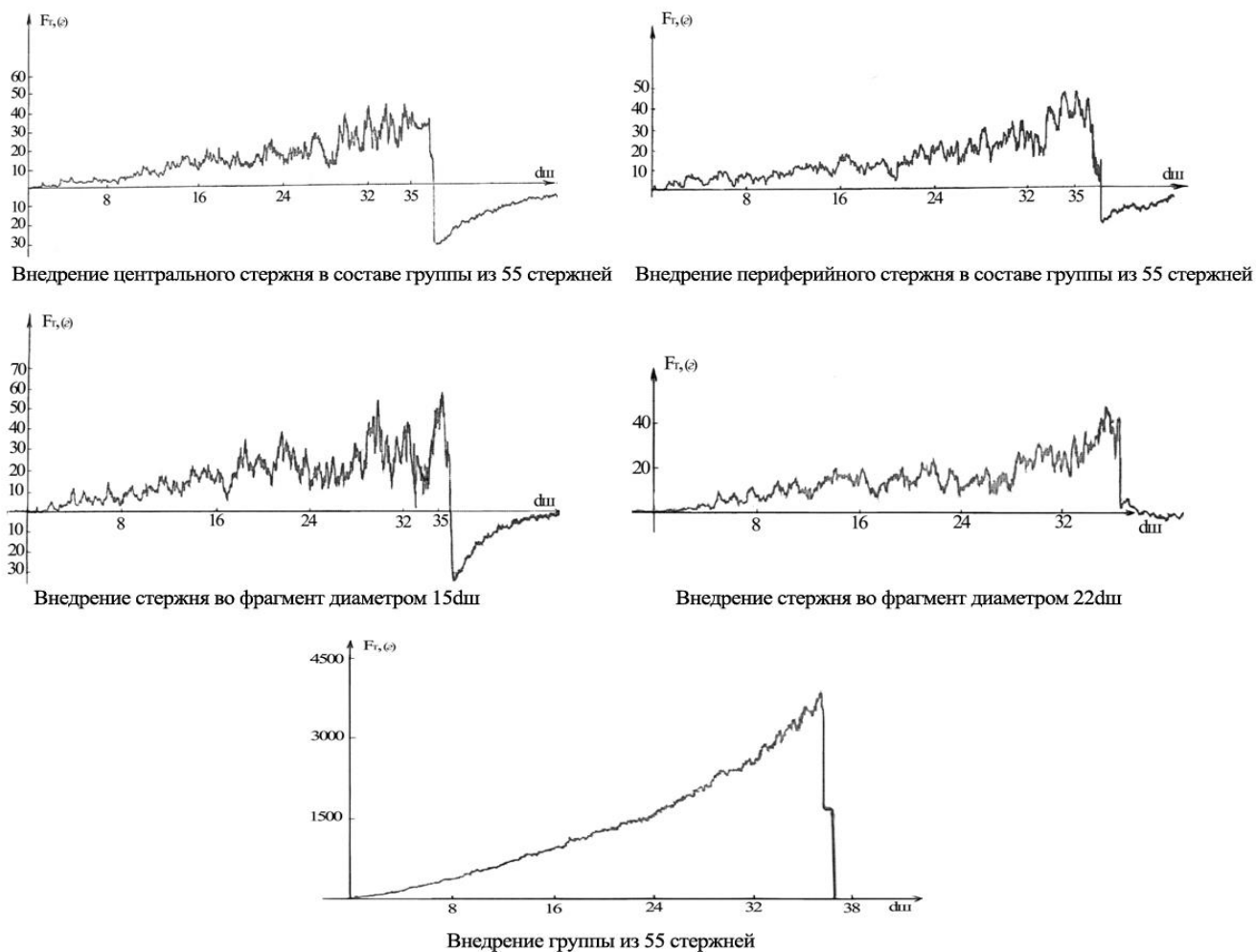


Рис. 2. Типовые графики усилий внедрения стержней в зависимости от глубины погружения

Как видно из графиков, реальный процесс носит характер хаотически чередующихся пиков и спадов осевых нагрузок, особенно интенсивно проявляющийся на единичных стержнях. Наибольший практический интерес как для определения наиболее представительных размеров фрагмента масштаба 1:1 а.з., так и для проектирования механизмов, обеспечивающих процесс внедрения, представляют максимальные нагрузки на стержни (пиковые усилия внедрения), возникающие в процессе погружения стержней на заданную глубину. Однако ввиду того, что доверительные интервалы стохастического распределения максимальных нагрузок, рассчитанные для различных условий моделирования, в большинстве экспериментов по ходу внедрения взаимно перекрываются, возникает вопрос: результаты каких экспериментов можно считать с заданной степенью вероятности отличающимся по усилиям внедрения, а какие имеют статистически незначительные различия. Поставленная задача решается методом проверки статистических гипотез относительно средних [5].

Проведенный таким образом дисперсионный анализ полученных результатов показал, что с вероятностью 97,5 % использование фрагментов а.з с диаметром $22d_{ш}$ и высотой $90d_{ш}$ не приводит к различиям по нагрузкам на стержень от получаемых при внедрениях стержня в модель а.з реактора ВГ-400 в составе группы из штатных 55 стержней на всех глубинах внедрения. Это означает, что фрагмент с данными размерами наиболее полно моделирует усилия внедрения, приходящиеся на единичный стержень в модель активной зоны, и, следовательно, для моделирования на полномасштабных графитовых шарах $d_{ш} = 0,06$ м достаточ-

но иметь не весь объем засыпки, а только ее фрагмент, вмещающий 32 000 шаров. Существенными оказались также и различия в усилиях внедрения центральных и периферийных стержней в составе группы – нагрузки на центральные стержни составляют в среднем 95 % от периферийных.

Интерес представляет также вопрос выявления факторов, существенным образом способных повлиять на величины усилий внедрения стержней. Априори принимались три фактора: степень перегруженности шаровой засыпки (т.е., изменение ее пористости в процессе рециркуляции), внутреннее трение шаровой засыпки и число произведенных последовательных внедрений стержней. С этой целью были спланированы полные трехфакторные эксперименты типа 2^3 [5]. для различных глубин внедрения с варьированием факторов, условно обозначенных А, В, и С на двух уровнях каждый, а именно:

- фактор А на уровнях: А1 (0 – нет перегрузки), А2 (100 % – перегружен один объем засыпки);
- фактор В на уровнях: В1 ($f_{\text{внутр}}=0,12$), В2 ($f_{\text{внутр}}=0,45$);
- фактор С на уровнях: С1 (первое внедрение), С2 (пятое внедрений).

Исследуемыми параметрами (откликами экспериментов) принимались значения максимальных нагрузок \bar{F}_{cm} на единичные стержни в составе группы из 55 стержней в четырех точках по ходу заглупления, а именно: $15d_{ш}$, $35d_{ш}$, $55d_{ш}$, $70d_{ш}$: для периферийного стержня и в пяти (до $80d_{ш}$) для центрального. При этом ввиду пульсирующего характера нагрузок значения нагрузок для последующего анализа брались с трендовой составляющей процесса внедрения, рассчитанной как аппроксимация полиномом второй степени. Получаемая точность такой аппроксимации вполне приемлема для оценок относительного влияния исследуемых факторов в трехфакторном эксперименте.

Эксперименты проводились тремя сериями для оценки воспроизводимости получаемых данных при одинаковых условиях внедрения в каждой серии.

В табл. 1 представлена матрица плана полного трехфакторного эксперимента 2^3 для двух масштабов моделирования М1:46 и М1:10 и глубины внедрения $35d_{ш}$. Здесь же приведены данные по дополнительным экспериментам с $f_{\text{внутр}} = 0,25$ и М1:3, уточняющим исследуемые эффекты. Матрицы плана для других глубин внедрения имеют аналогичную структуру.

Параметр x_0 означает наличие свободного члена в предполагаемой регрессионной модели исследуемых эффектов.

Для оценки влияния изучаемых факторов применялись процедуры дисперсионного и регрессионного анализов.

Таблица 1

Матрица плана полного трехфакторного эксперимента типа 2^3

№ серии эксперимента	x_0	x_1 (перегрузка)	x_2 ($f_{\text{внутр}}$)	x_3 (кол-во внедрений)	Факторы взаимодействия				$\bar{F}_{cm}(кг)$ при $H=35d_{ш}$	
					x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	М1:46	М1:10
1	+	- (перегрузки нет)	- (0,12)	- (первое внедрение)	+	+	+	-	0,031	3,0
2	+	+ (перегрузка есть)	- (0,12)	- (первое внедрение)	-	-	+	+	0,024	2,36

Окончание табл. 1

3	+	- (перегрузки нет)	+ (0,45)	- (первое внедрение)	-	+	-	+	0,108	10,48
4	+	+ (перегрузка есть)	+ (0,45)	- (первое внедрение)	+	-	-	-	0,084 0,081	8,25
5	+	- (перегрузки нет)*	- (0,12)	+ (пятое внедрение)	+	-	-	+	0,03	2,9
6	+	+ (перегрузка есть)	- 0,12	+ (пятое внедрение)	-	+	-	-	0,023	2,28
7	+	- (перегрузки нет)	+ (0,45)	+ (пятое внедрение)	-	-	+	-	0,105	10,14
8	+	+ (перегрузка есть)	+ (0,45)	+ (пятое внедрение)	+	+	+	+	0,0812	7,98
Дополнительные эксперименты										
9		(перегрузка нет)	0,25	(первое внедрение)					0,061	5,62
10		(перегрузка есть)	0,25	(первое внедрение)					0,048	4,67
11		(перегрузка нет)	0,36	(первое внедрение)					M 1:3	
									86,13	
12		(перегрузка есть)	0,36	(первое внедрение)					67,83	

Дисперсионный анализ [6] применялся с целью выявления значимости исследуемых факторов и их взаимодействий с учетом имеющих место погрешностей при воспроизведении однотипных экспериментов. Оценка производилась по экспериментальным значениям F_0 – критерия Фишера относительно его табличного значения $F_{(0,025, 1, 6)} = 8,81$ при задаваемом уровне значимости в 2,5 % и при степенях свободы спланированных экспериментов $f_1 = 1$ и $f_2 = 6$.

Регрессионный анализ [7] применялся для установления количественной взаимосвязи между факторами. Связь между этими переменными характеризуется математической моделью, которая называется уравнением регрессии. В нашем случае ставится задача подбора линейной регрессии вида (1):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon_r, \quad (1)$$

где β_k – коэффициенты регрессии.

Процедура регрессионного анализа содержит три позиции: расчет коэффициентов регрессии, проверка адекватности принятой модели и проверка значимости коэффициентов.

В табл. 2. приведены результаты дисперсионного и регрессионного анализа трехфакторного эксперимента для глубины внедрения $35d_{ш}$. Для других глубин внедрения проведенные расчеты дали качественно идентичные результаты.

Степень значимости при регрессионном анализе определялась на основе полученных коэффициентов регрессии с учетом величины отклонения отклика.

Таблица 2

Таблица результатов дисперсионного и регрессионного анализа трехфакторного эксперимента для глубины внедрения $35d_{ш}$

Глубина, внедрения	Дисперсионный анализ			Регрессионный анализ	
	Факторы	Экспериментальные значения критерия Фишера F_0 относительно $F_{(0,025, 1, 6)}$	Значимость факторов	Коэффициенты уравнения регрессии	
				M1:46	M1:10
$5d_{ш}$	A	$F_0 > 8,81$	да	$\beta_0 = 0,0604$	$\beta_0 = 5,92$
	B	$F_0 > 8,81$	да	$\beta_1 = -0,0081$	$\beta_1 = -0,71$
	C	$F_0 < 8,81$	нет	$\beta_2 = 0,031$	$\beta_2 = 3,29$
	AB	$F_0 < 8,81$	нет	$\beta_3 = -0,0006$	$\beta_3 = -0,099$
	AC	$F_0 < 8,81$	нет	$\beta_4 = -0,004$	$\beta_4 = -0,039$
	BC	$F_0 < 8,81$	нет	$\beta_5 = 0,0004$	$\beta_5 = 0,011$
	ABC	$F_0 < 8,81$	нет	$\beta_6 = -0,0001$	$\beta_6 = -0,054$
				$\beta_7 = 0,0004$	$\beta_7 = 0,007$

Статистически значимыми с вероятностью 97,5 % можно считать только два фактора: А (степень перегруженности засыпки, влияющая на ее пористость) и В (величина внутреннего трения засыпки $f_{внутр.}$). Влияние фактора С (количества последовательных внедрений) не существенно за исключением самых верхних слоев засыпки, где с увеличением количества внедрений образуются углубления под местами входа стержней. Факторы взаимодействия также можно считать несущественными. Таким образом, с учетом, что $\beta_2 > \beta_1$, трение является фактором, определяющим (при прочих равных условиях) величину усилий внедрения. В табл. 3. приведены усредненные данные по усилиям внедрения периферийного стержня в составе группы из 55 стержней в предварительно однократно перегруженную засыпку в зависимости от масштаба моделирования, коэффициента трения и материала шаров с разбивкой по диапазонам глубины внедрения.

Таблица 3

Усилия внедрения единичных стержней в составе группы 55 стержней

Масштаб модели, материал шаров	Коэффициент трения ($f_{внутр.}$)	Глубина внедрения (в диаметрах шаров)			
		(15-30) $d_{ш}$	(30-50) $d_{ш}$	(50-70) $d_{ш}$	(70-80*) $d_{ш}$
		Усилия внедрения стержня (кг)			
M1:46, сталь	0,12	0,011-0,022	0,022-0,036	0,036-0,061	0,061-0,072
	0,25	0,019-0,045	0,045-0,075	0,075-0,126	0,127-0,155
	0,45	0,031-0,072	0,072-0,136	0,136-0,229	0,229-0,278
M1:10, сталь	0,12	1,06-2,18	2,14-3,54	3,54-5,96	5,96-7,15
	0,25	1,85-4,18	4,18-7,35	7,35-12,25	12,35-15,25
	0,45	3,03-7,01	7,01-13,88	13,88-22,28	22,28-27,06
M1:3, стекло	0,36	26,4-60,1	60,0-118,5	118,5-186,1	186,1-224,9
M1:1** графит	0,18	291-635	636-1085	1086-1800	1800-2235

*) внедрение единичного стержня по центру модели

***) внедрение во фрагмент диаметром $22d_{ш}$ и высотой $90d_{ш}$

Используя полученные экспериментальные данные по усилиям внедрения погружных стержней, составлена в соответствии с принципами теории подобия эмпирическая аппрокси-

мационная зависимость для пересчета результатов модельных испытаний на предполагаемые натурные условия реактора (2):

$$F_{ст(н)} = F_{ст(м)} \left(\frac{M_n}{M_m} \right)^3 \left(\frac{\gamma_n}{\gamma_m} \right) \left(\frac{f_n}{f_m} \right)^\alpha, \quad (2)$$

где $F_{ст(н)}$, $F_{ст(м)}$ – соответственно натурные и модельные усилия внедрения;

$\frac{M_n}{M_m}$, $\frac{\gamma_n}{\gamma_m}$, $\frac{f_n}{f_m}$ – соответственно отношения масштабов, удельных весов (насыпной плотности с учетом пористости засыпки) и коэффициентов трения натуральных и модельных шаров.

Коэффициент α , представленный в табл. 4, выбирается в соответствии с диапазоном глубины внедрения стержня. Здесь также представлены результаты пересчета модельных испытаний на условия однократно перегруженной активной зоны реактора ВГ-400. Следует отметить, что в аналогичном соотношении, предложенном при проектировании реактора ТНТР-300 (Германия), значение $\alpha = 0,28$ [8]. По нашим данным, полученным по результатам испытаний в широком спектре коэффициентов трения, эту величину следует считать заниженной (табл. 4). Вызывает сомнение также и значение показателя степени при соотношении удельных весов, принятое равным 1,2. Исходя из физического смысла и по данным наших исследований этот показатель должен быть равным 1.

Таблица 4

Расчетные значения усилий внедрения стержня в реакторе ВГ-400

Пересчет на условия реактора по формуле (1)	Коэффициент трения ($f_{внутр}$)	Глубина внедрения (в диаметрах шаров)			
		15-30 $d_{ш}$	30-50 $d_{ш}$	50-70 $d_{ш}$	70-80* $d_{ш}$
		Значение коэффициента α			
		0,8-0,9	0,9-1,0	1,0-1,02	
		Усилие внедрения стержня (кг)			
0,12	210-445	445-740	740-1205	1205-1475	
0,25	378-860	855-1540	1505-2530	2530-3120	
0,45	605-1460	1440-2775	2775-4580	4570-5680	

Для глубины внедрения $35d_{ш}$ имеем:

1. После стартовой загрузки: $F_{ст} = 615\text{кг}$ ($f_{внутр} = 0,12$); $F_{ст} = 1220\text{кг}$ ($f_{внутр} = 0,25$); $F_{ст} = 2150\text{кг}$ ($f_{внутр} = 0,45$).
2. После рециркуляции одного объема: $F_{ст} = 480\text{кг}$ ($f_{внутр} = 0,12$); $F_{ст} = 960\text{ кг}$ ($f_{внутр} = 0,25$); $F_{ст} = 1680\text{кг}$ ($f_{внутр} = 0,45$).

Таким образом, установлено, что максимальные усилия внедрения после выхода засыпки в установившийся режим движения составляет до $F_{ст} = 5,6-5,7\text{ т.}$ (при погружении на максимальную глубину $80d_{ш}$. и ожидаемом коэффициенте трения $f_{внутр} = 0,45$). В начальный период после стартовой загрузки реактора усилия будут несколько выше $F_{ст} = 7,1-7,2\text{ т.}$ Следует отметить, что по данным [8] нагрузка на стержень на глубине $80d_{ш}$ ($4,8\text{м}$) при $f_{внутр} = 0,54$ составила $F_{ст} = 7\text{т.}$ В целом по глубинам нагрузки на стержень, представленные в [8], весьма незначительно отличаются от оценок, полученных при наших исследованиях.

Значительным недостатком, помимо больших усилий внедрения и осевых нагрузок на стержни, являются имевшие место случаи повреждения шаров (образование выщербин и сколов). По данным [8], эффективным способом снижения вероятности повреждения твэл является применение усовершенствованной конструкции наконечника стержня в виде лункообразного углубления, захватывающего один твэл и снижающего тем самым удельные нагрузки в точках касания. К недостаткам следует относить увеличение давления засыпки твэлов на блоки отражателей, а также миграцию твэлов в процессе циклов внедрения – извлечения стержней. При этом стержни заглубляют единичные шары на $\approx 2d_{ш}$, но в то же время вся свободная поверхность засыпки приподнимается на $\approx d_{ш}$. При извлечения стерж-

ней происходит дополнительная миграция до $5-6d_{ш}$ в результате заполнения шарами образующихся каналов (пустот) под местами внедрения.

Эксперименты по внедрению мелких поглощающих элементов (пэлов) в засыпку твэл

В проведенных экспериментах по внедрению мелких поглощающих шаров в засыпку твэл объектами испытаний были два варианта фрагментов шаровых засыпок со стальными шарами диаметром 0,008 м и графитовыми шарами диаметром 0,06 м. В качестве имитаторов пэлов использовались соответственно стальные шарики диаметром 0,0013 м и графитовые диаметром 0,01 м. В первом варианте фрагмент представлял собой обечайку диаметром $10d_{ш}$, заполненную стальными шарами-имитаторами твэл диаметром $d_{ш} = 0,008$ м, по оси которой поочередно вводились в засыпку стальные шары-имитаторы пэл диаметром 0,0013 м в количестве 100 шт. При подаче мелких шаров с небольшой высоты (не более $d_{ш}$) только 2,3 % шаров проникало глубже $14d_{ш}$. Основная масса (до 73 %) двигалась под точкой ввода в зоне одного $d_{ш}$. Картина резко менялась при увеличении высоты падения шаров до $11d_{ш}$: через слой шаров в $14d_{ш}$ прошло 23 % мелких шаров, причем 85 % их двигалось в пристеночной зоне фрагмента. Это очевидно объясняется увеличением зоны рассеивания шаров при отскоке от поверхности засыпки и снижением тем самым вероятности заклинивания их в результате сводообразования в проходных сечениях засыпки.

Во втором варианте эксперименты проводились на фрагменте пристеночной области а.з. проекта ВГМ М1:1, заполненный графитовыми шарами $d_{ш} = 0,06$ м в количестве 1900 шт. Заполнение фрагмента проводилось свободным падением шаров с высоты $5d_{ш}$ порциями по 3-4 шт. В качестве шаров-имитаторов пэл использовались графитовые шарики диаметром 0,01 м, подаваемые на поверхность засыпки в количестве 420-470 шт. с высоты $7d_{ш}$. Установлено, что зона проникновения (распределение) имитаторов пэл во фрагменте существенным образом зависит от способа их подачи:

- при поштучной подаче шариков всю высоту фрагмента засыпки $14d_{ш}$ проходит 66 % шаров; остальные распределяются в вышележащих слоях, в том числе, 3 % непосредственно вблизи свободной поверхности;
- при поштучно-групповой подаче («цепочкой») порциями по 10 шт. – только 38 % проходит всю высоту засыпки, а 34 % задерживаются в районе свободной поверхности;
- при групповой (массовой) подаче одновременно всех используемых шариков только 12 % проходят всю высоту засыпки фрагмента, а 54 % задерживаются вблизи свободной поверхности;
- во всех трех вариантах зона проникновения по радиусу фрагмента составила $4d_{ш}$, причем вдоль боковой стенки задерживается 74-82 % шариков, а по азимуту зона проникновения составляет не менее 360, причем 35-85 % шариков группируются под местом ввода.

Таким образом, максимальные проблемы с проникновением пэлов в засыпку твэл возникают при массовой подаче их в а.з. в режиме компенсации реактивности, решение которых состоит в выборе оптимального способа подачи пэлов в сочетании с уменьшением их диаметра до размеров не более $1/5$ максимального размера проходного сечения в шаровой засыпке. Эта величина составляет $0,155d_{ш}$, т.е. для твэл с $d_{ш} = 0,06$ м, пэлы должны иметь диаметр 0,003 м. Другой серьезной проблемой рассмотренного способа компенсации реактивности является вывод поглощающих шариков из засыпки для последующего выхода реактора в критическое состояние, что требует специальных дополнительных исследований.

Заключение

Установлено, что максимальные усилия внедрения стержней после выхода засыпки в установившийся режим движения составляют до $F_{ст} = 5,6-5,7$ т. (при погружении на максимальную глубину $80d_{ш}$. и ожидаемом коэффициенте трения $f_{внутр} = 0,45$). В начальный период после стартовой загрузки реактора усилия будут несколько выше $F_{ст} = 7,1-7,2$ т.

Наибольшие проблемы с проникновением пэлов в засыпку твэл возникают при массовой подаче их в а.з в режиме компенсации реактивности, решение которых состоит в выборе оптимального способа подачи пэлов в сочетании с уменьшением их диаметра до размеров не более $1/5$ максимального размера проходного сечения в шаровой засыпке. Эта величина составляет $0,155d_{ш}$, т.е., для твэлов с $d_{ш} = 0,06$ м, пэлы должны иметь диаметр $0,003$ м.

Библиографический список

1. **Богоявленский, Р.Г.** Определение усилий при внедрении моделей стержней в шаровую засыпку / Р.Г. Богоявленский, П. Лубны-Герцык, Ю.Д. Никифоров // ВАНТ. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология. – 1982. – Вып.1(11). – С. 85.
2. **Мордвинцев, В.М.** Влияние технологических факторов на внедрение стержней в шаровую засыпку / В.М. Мордвинцев, В.В. Милов и др. // ВАНТ, сер. Ядерная энергетика и технология. – 1990. – Вып.2. – С. 68-70.
3. **Карпов, В.А.** Компенсация реактивности мощных реакторов НТР с шаровыми твэлами / В.А. Карпов, Н.Б. Адамова // Атомная техника за рубежом. – №11. – С. 1979.
4. **Мордвинцев, В.М.** Способ испытаний регулирующих стержней, погружаемых в шаровую засыпку / В.М. Мордвинцев, А.С. Майзус, А.Г. Любимый, В.В. Булыгин, В.А. Чуманин // А.С. СССР № 1279418, от 22.08.1985 г.
5. **Монтгомери, Д.К.** Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 491 с.
6. **Шеффе, Г.** Дисперсионный анализ / Г. Шеффе. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
7. **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. Applied Regression Analysis. / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Диалектика, 2007. – С. 912.
8. Физико-механические исследования и расчеты конструкций оборудования атомных энергетических установок. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1975. – 340 с.

*Дата поступления
в редакцию: 01.03.2019*

V.M. Mordvintsev, N.G. Kodochigov, Yu.P. Sukharev

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF PROCESSES OF INPUT IN HTGR PEBBLE BED
MEANS OF REACTIVITY COMPENSATION**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering, JSC «Afrikantov OKBM»

Purpose: the purpose of the lead researches was developing of methodology of an estimation of efforts of introduction on control rods of reactivity compensation system at their inserting into pebble bed and forecasting of efforts of introduction in existing gas cooled reactors projects, definition of effects of cores accompanying control rods introduction, and also an estimation of an opportunity of use as reserve ball system of reactivity compensation.

Methodology approach: in the lead researches the experimentally-calculated approach to definition of efforts of introduction of sinking control rods, based on physical modelling of process of introduction of cores with use of principles of the theory of similarity, the theory of planning of experiments with dispersive and regression analyses of results was applied.

Results: received volume of experimental data-settlement and their analysis have allowed to develop analytical dependences with which use estimations of efforts of introduction of control rods in fuel element pebble bed cores of known HTGR projects. The comparison of the received results with data of foreign researches was made. Features and effects are established at filling of fuel pebble bed by fine balls-absorbing elements.

Conclusions: the developed methodology of forecasting of efforts of introduction of control rods into fuel element pebble bed enables to spend on a design stage of reactors of an estimation of working capacity sinking control rods and mechanisms of Control and Safety System to optimize their design.

Keywords: reactivity compensation system, spherical fuel elements, effort of introduction of control rod, dispersive and regression analyses, reserve reactivity compensation system, fine absorbing spheres.